

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

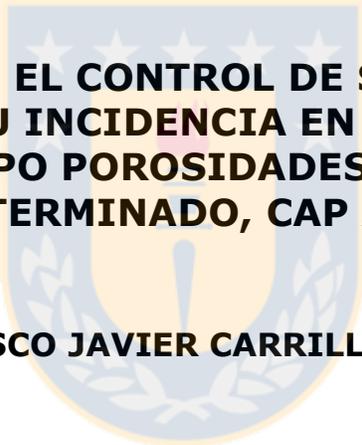
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesora Patrocinante

Sra. Eugenia Araneda

Ingeniero Supervisor

Sr. Rodrigo Espinoza



**“MEJORAS EN EL CONTROL DE SOPLADO EN EL
CONVERTIDOR Y SU INCIDENCIA EN LA DISMINUCIÓN DE
DEFECTOS TIPO POROSIDADES EN PRODUCTO
SEMITERMINADO, CAP ACERO”**

FRANCISCO JAVIER CARRILLO CAMPOS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Mayo, 2017

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi familia, a mis padres Antonio y Sandra, sin su apoyo incondicional e "insistencia" en mis estudios, talvez me habría demorado más tiempo en terminar.

A don Orlando Cartes, por sus gestiones que me dieron la posibilidad de realizar la memoria de título en CAP Acero. A todos los integrantes del departamento de IDAC, a don Pedro Contreras, Miguel Mardones, Karina Miranda y Felipe Campos, y en especial a don Jaime Baeza que amenizaron mi estancia en el departamento. A Ingeniería de Procesos del departamento de acería por su excelente disposición ante cualquier necesidad que se me presentara.

Agradecer enormemente a don Rodrigo Espinoza, por guiarme durante todo mi trabajo en la planta, y su exigencia, la cual me motivó a superar todos los obstáculos que pudieron surgir en el camino. A mis profesores Eugenia Araneda y Eduardo Balladares por su confianza y disponibilidad ante cualquier interrogante que surgiera sobre la realización de mi trabajo.

A mis amigos del Salesiano de toda la vida, mis compañeros de universidad, que con el pasar de los años se transformaron en grandes amigos y colegas, y a todo aquel que de una u otra manera formaron parte importante en esta larga etapa universitaria, de corazón, muchas gracias.

Resumen

El estudio tiene como objetivo principal determinar la influencia de las modificaciones en las prácticas de procesamiento del acero realizadas en el departamento de Acería y Colada Continua de CAP Acero para disminuir defectos tipo porosidades internas y externas, validando el modo de operación, reflejado en la disminución del porcentaje de defectos en el producto semiterminado.

Los pinholes y blowholes (porosidades externas e internas, respectivamente), son generados por la acumulación de gases disueltos en el acero al momento de su solidificación. Un exceso de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno durante el proceso de conversión, ajuste y colada del acero, puede llevar a la aparición de estos defectos.

Con el fin de mejorar el proceso de conversión se implementó un nuevo software en el convertidor BOF que optimiza el soplado, lo que conlleva una disminución de oxígeno en el acero durante esta primera etapa. Por su parte, en el proceso de colada continua, se hace uso de agitadores de molde electromagnéticos, los cuales permiten liberar los gases que durante el proceso no pudieron ser removidos del acero.

Mediante balances de masa y análisis estadístico de datos se logró cuantificar las diferencias positivas en el proceso, comparando el periodo anterior a las modificaciones con el periodo actual con las mejoras ya operativas.

La metodología a seguir consistió en la comparación de datos entre el periodo estándar y el periodo modificado, contrastándolos con los resultados teóricos esperados en cada etapa del proceso.

La aplicación de estas mejoras llevó a disminuir drásticamente el porcentaje de aparición de porosidades dañinas, mayores a 3 mm en el semiterminado muestreado, de un 70% en promedio a un 1,38%.

Abstract

The main objective of the study is to determine the influence of the modifications in the steel processing practices carried out at the Steelmaking department of CAP Acero to reduce internal and external porosities type defects, validating the mode of operation, reflected in the decrease of the percentage of defects in the semi-finished product.

Pinholes and blowholes (external and internal porosities, respectively) are generated by the accumulation of dissolved gases in the steel at the time of its solidification. An excess of oxygen, nitrogen and hydrogen during the process of conversion, adjustment and casting of the steel can lead to the appearance of these defects.

In order to improve the conversion process, a new software was implemented in the BOF converter that optimizes the blowing, which leads to a decrease of oxygen in the steel during this first stage. On the other hand, in the continuous casting process, mold electromagnetic stirrers are used, which release the gases that have not been removed from the steel during the process.

By means of mass balances and statistical analysis of data, it was possible to quantify the positive differences in the process, comparing the period before the modifications with the current period with the already operational improvements.

The methodology was to compare data between the standard period and the modified period, contrasting them with the expected theoretical results at each stage of the process.

The application of these improvements led to a drastic decrease in the percentage of harmful porosities, greater than 3 mm in the sampled semifinished product from an average of 70% to 1.38%.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Descripción del problema en estudio	2
1.3 Objetivos	4
Capítulo 2. Desarrollo Teórico	5
2.1 Descripción del proceso productivo	5
2.2 Departamento de Acería y Colada Continua	8
2.2.1 Convertidor BOF	8
2.2.2 Caracterización del Acero	13
2.2.3 Aspectos Físicoquímicos de la producción de Acero	14
2.2.4 Química del proceso	14
2.2.5 Reacciones durante la producción del acero	15
2.2.6 Oxidación del hierro	17
2.2.7 Metalurgia Secundaria	18
2.2.8 Desoxidación	20
2.2.9 Colada Continua	22
2.2.10 Agitación Electromagnética en Proceso de Colada Continua.	23
2.3 Defectos tipo porosidades	26
2.3.1 Hidrógeno	30
2.3.2 Nitrógeno	31
2.4 BOF Calculator	33
Capítulo 3: Análisis de datos operacionales, de producción y pruebas industriales.	36
3.1. Uso de Softwares	36
3.2. Balance en el Convertidor BOF	37
3.3 Balance en la Metalurgia Secundaria	42
3.4 Uso de Agitadores Electromagnéticos de Molde (M-EMS) en la Colada Continua	45
Capítulo 4. Resultados y Discusiones	47
4.1 Balance de Masa Convertidor BOF	47
4.1.1 Óxido de Hierro en la escoria	48

4.1.2 Oxígeno insuflado al convertidor.....	52
4.1.3 Oxígeno disuelto en el acero	53
4.1.4 Masa de escoria generada.....	55
4.2 Comportamiento del Oxígeno en la Metalurgia Secundaria	57
4.2.1 Influencia y Análisis del Nitrógeno en la metalurgia secundaria.....	61
4.2.2 Hidrógeno en el acero.....	63
4.3 Uso de Agitadores Electromagnéticos de Molde (M-EMS) en la Colada Continua.....	66
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	68
6. Bibliografía.....	70
7. Anexos	72
Anexo A: Ejemplos de cálculos	72
Anexo B: Balance de masa general y por composición de flujo	76
Anexo C: Caracterización del arrabio.....	77
Anexo D: Caracterización de la chatarra	78
Anexo E Caracterización de las adiciones	80
Anexo F: Parámetros controlables durante la Metalurgia Secundaria.....	81
Anexo I: Ensayo de Macrografías.....	84
Anexo J: Macrografías de pruebas realizadas sin M-EMS.....	85

Índice de Figuras

Figura 1: Macrografías grado 1006, agosto 2016.	3
Figura 2: Primera etapa, reducción del mineral.....	6
Figura 3: Segunda etapa, fabricación del acero.	7
Figura 4: Colada y laminación del acero.	8
Figura 5: Esquema del Convertidor BOF-LD	9
Figura 6: Etapas del proceso de conversión; a) Carga de Chatarra, b) Carga de arrabio, c) Uso de dardo para sangrar acero, d) Sangrado del acero	12
Figura 7: Actividad del FeO en escoria SiO ₂ -CaO-FeO en equilibrio con hierro a 1600°C.....	16
Figura 8: Horno Cuchara	20
Figura 9: Efecto de la temperatura y la presión sobre la solubilidad del carbono y del oxígeno en el hierro líquido.....	21
Figura 10: Esquema de máquina colada continua.	23
Figura 11: Tipos de EMS.....	26
Figura 12: Equilibrio entre las concentraciones de [C] y [O] a diferentes presiones	27
Figura 13: Solubilidad de hidrógeno y nitrógeno en hierro.	29
Figura 14: Influencia del contenido de hidrógeno y nitrógeno en la ocurrencia de pinholes y su máxima longitud en función de la actividad del oxígeno.....	30
Figura 15: Solubilidad de hidrógeno en equilibrio con hierro fundido.	31
Figura 16: Solubilidad de nitrógeno en equilibrio con hierro fundido.	32
Figura 17: Pantalla de inicio, plataforma Refinox.	33
Figura 18: Pantalla de "parámetros" en BOF Calculator.	34
Figura 19: Balances de materia elaborados por BOF Calculator.....	35
Figura 20: Flujos de entrada y salida en el convertidor BOF	39
Figura 21: %FeO medido vs %FeO calculado, ajustado a media móvil. Periodo Estándar.	48
Figura 22: %FeO medido vs %FeO calculado, ajustado a media móvil. Periodo Modificado.....	48
Figura 23: Gráfico de frecuencias con datos calculados de %FeO.....	50
Figura 24: Gráfico de frecuencias con datos medidos de %FeO.....	51
Figura 25: O ₂ estequiométrico teórico vs O ₂ soplado, periodo estándar.	52
Figura 26: O ₂ estequiométrico teórico vs O ₂ soplado, periodo modificado.	52
Figura 27: ppm de O ₂ en el periodo estándar vs ppm de O ₂ en periodo modificado.	54
Figura 28: Masa de escoria medida vs Masa de escoria calculada, ajustado a media móvil. Periodo Estándar	55
Figura 29: Masa de escoria medida vs Masa de escoria calculada, ajustado a media móvil. Periodo Modificado.....	56
Figura 30: Composición de la escoria a la llegada (S1) y salida (S2) de la estación de ajuste. Periodo Estándar.	58
Figura 31: Composición de la escoria a la llegada (S1) y salida (S2) de la estación de ajuste. Periodo Modificado.....	59
Figura 32: Composición típica de escoria del convertidor BOF.....	60
Figura 33: Concentración de nitrógeno al comienzo de la EAM vs nitrógeno como gas agitador en el convertidor BOF. Periodo Estándar.	61
Figura 34: Concentración de nitrógeno al comienzo de la EAM vs nitrógeno como gas agitador en el convertidor BOF. Periodo Modificado.	62

<i>Figura 35: Variación de nitrógeno según las etapas de la metalurgia secundaria.</i>	63
<i>Figura 36: Porcentaje de pinholes mayores a 3 mm. durante el segundo semestre 2016.</i>	65
<i>Figura 37: Macrografías de corte transversal de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cabeza</i> <i>.....</i>	66
<i>Figura 38: Macrografías de palanquillas correspondientes a las líneas 2 y 4 respectivamente.</i> <i>Prueba 2</i>	67
<i>Figura 39: Perfil de tratamiento simplificado que ilustra el control de agitación y temperatura.</i> <i>.....</i>	82
<i>Figura 40: Agitación con Argón con dos porosos operando.</i>	82
<i>Figura 41: Agitación con Argón con un poroso operando</i>	83
<i>Figura 42: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cabeza.</i>	85
<i>Figura 43: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Medio.</i>	86
<i>Figura 44: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cola.</i>	86
<i>Figura 45: Macrografía de muestra Cola, correspondientes a la línea 2 de la Colada Continua.</i>	87
<i>Figura 46: Macrografía de muestra Cabeza, correspondientes a la línea 2 de la Colada</i> <i>Continua.</i>	87
<i>Figura 47: Macrografía de muestra Cola, correspondientes a la línea 4 de la Colada Continua</i>	88
<i>Figura 48: Macrografía de muestra Cabeza, correspondientes a la línea 4 de la Colada</i> <i>Continua.</i>	88

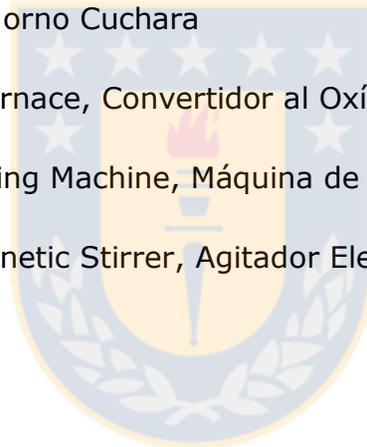


Índice de Tablas

Tabla 1: Composición química de aceros grado 1006.....	2
Tabla 2: Reacciones principales en el proceso de conversión.	15
Tabla 3: Descripción de las adiciones usadas en la metalurgia secundaria.....	44
Tabla 4: Clasificación de pinholes según su longitud.....	46
Tabla 5: Porcentaje de óxido de hierro medido en la escoria.	49
Tabla 6: Tabla de frecuencias correspondiente a datos calculados de %FeO.	50
Tabla 7: Tabla de frecuencias correspondiente a datos medidos de %FeO.....	51
Tabla 8: Eficiencia del O ₂ soplado comparado con el O ₂ estequiométrico.....	53
Tabla 9: Concentración de O ₂ disuelto en el acero, antes de finalizar el proceso de soplado. ..	53
Tabla 10: Tabla de frecuencias de concentración de O ₂ disuelto en el acero.	54
Tabla 11: Masas de escoria en periodo estándar y modificado.	56
Tabla 12: Concentraciones de oxígeno en la estación de ajuste.	57
Tabla 13: Adiciones al grado 1006 en la estación de ajuste.....	58
Tabla 14: Mediciones de hidrógeno en la artesa.....	64
Tabla 15: Palanquillas muestreadas con defectos tipo porosidades mayores a 3 mm.	65
Tabla 16: Composición química estándar del arrabio.	78
Tabla 17: Tipos de Chatarra usadas en CAP Acero.	79
Tabla 18: Composición química de la chatarra.....	79
Tabla 19: Composición química de las adiciones	81
Tabla 20: Aporte de temperatura por cada minuto de calentamiento en diferentes TAP.	83

Nomenclatura y abreviaciones

IDAC:	Departamento de Investigación, Desarrollo y Asistencia al Cliente
MES:	Manufacturing Execution System, Plataforma de Control de procesos
EAM:	Estación de Ajuste Metalúrgico
LF:	Ladle Furnace, Horno Cuchara
BOF:	Basic Oxygen Furnace, Convertidor al Oxígeno
CCM:	Continuous Casting Machine, Máquina de Colada Continua
M-EMS:	Mold Electromagnetic Stirrer, Agitador Electromagnético de molde



Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

La fabricación de acero es un proceso de oxidación selectiva de impurezas en el hierro fundido. Durante este proceso, sin embargo, el acero también disuelve una pequeña cantidad de gases. La solubilidad de estos gases (O_2 , H_2 , N_2) en el acero es muy pequeña, del orden de las ppm (J. Enríquez, 2007).

La generación de defectos tipo porosidades en el producto semiterminado está determinada por los gases disueltos en el acero, los que no alcanzan a difundir desde el seno hacia la superficie de la palanquilla durante su solidificación, por lo que quedan ocluidos durante este proceso en la colada continua. Esta concentración de gases produce una presión parcial, la cual al superar la cantidad de 1,04 atm (valor desarrollado en la sección 2.3), dan paso a la generación de los llamados pinholes y blowholes; los primeros corresponden a los defectos en la superficie de la palanquilla (producto semiterminado) y los segundos son las porosidades internas (Ch.-Y. Chen, 2011; 2nd International Conference on Clean Steel, 1981).

Las modificaciones en las prácticas operacionales en el departamento de acería hacen énfasis en disminuir la cantidad de estos gases disueltos, mediante el siguiente cambio:

- Implementación de un nuevo software controlador del proceso BOF en el convertidor LD, ajustando de una forma más eficiente el soplado de oxígeno en cuanto a distribución y masa, e influyendo en la tasa de soplado aparte de su incidencia en un mejor control de la hornada fabricada.

El estudio realizado apunta a la validación del actual modelo de producción de acero, comprobando que la forma de operar actual, en comparación al periodo estándar antes de las modificaciones, es la principal causa en la disminución de los defectos tipo porosidades en el producto semiterminado.

Para este estudio se analizó un acero 1006, buscando una mejora en su calidad con respecto al volumen de defectos encontrados en la palanquilla.

La composición química estándar de este grado se presenta en la tabla 1.

Tabla 1: Composición química de aceros grado 1006¹

Acero	%C	%Mn	%P	%S	%Si	ppm N
1006	0,08	0,33	0,03	0,03	0,09	80

Este acero es de calidad comercial y de metalurgia semi calmada, producido para ser comercializado como materia prima para la fabricación de alambres, clavos, mallas y otros.

1.2 Descripción del problema en estudio

Durante la campaña del segundo semestre 2016 se registró un aumento significativo en los defectos tipo porosidades en las palanquillas del grado 1006, presentados principalmente en los bordes de la palanquilla y con forma de pequeñas grietas alargadas, cómo es posible apreciar en la figura 1.

A modo de resaltar los defectos, se presentan dos imágenes de la misma macrografía, pero en la figura de la derecha, los defectos están marcados de color rojo.

La longitud de estas porosidades (externas principalmente), contribuyo a un posterior aumento de defectos en el alambón, que corresponde al producto terminado obtenido con este grado de acero.

¹ Documentos CAP Acero

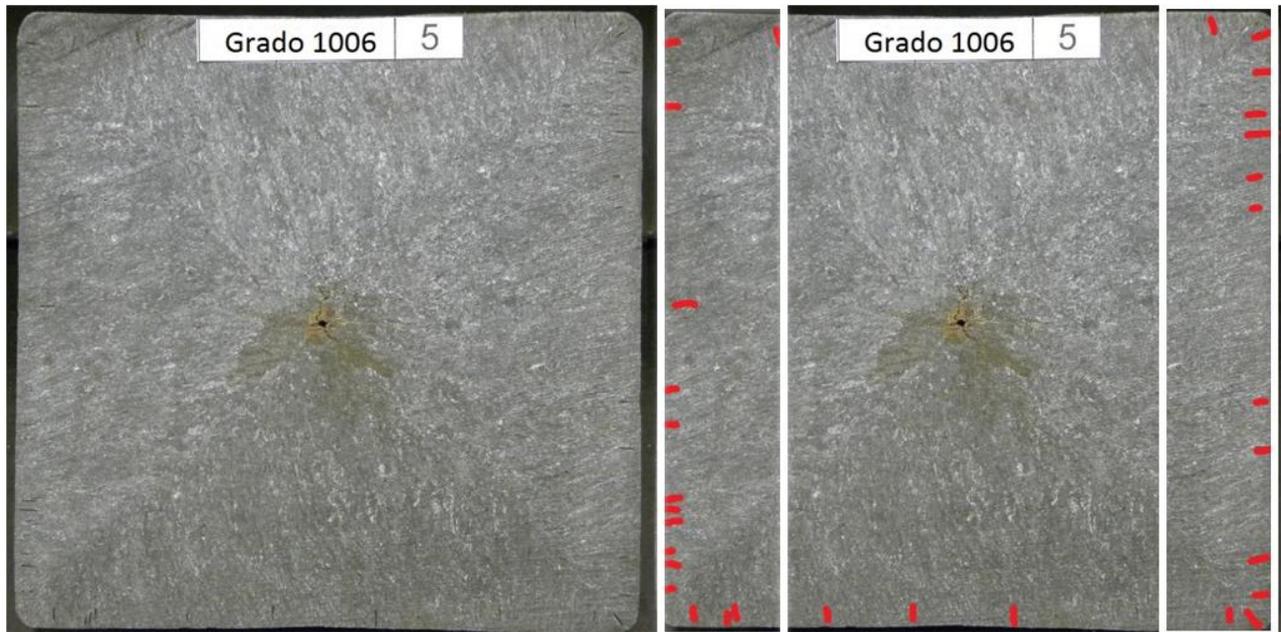


Figura 1: Macrográficas grado 1006, agosto 2016.

Entre los distintos planes de acción tomados por la compañía para afrontar este problema se encuentran:

- Incremento en el tiempo de tratamiento en la estación de ajuste (de 30 a 40 min)
- Mitigación de las fuentes de humedad ambiental (aportadoras de hidrógeno).
- Aumento en el número de macrográficas muestreadas por hornada del grado en estudio (a modo de controlar la frecuencia de aparición de las porosidades).

Pero el cambio más significativo y en el cual está enfocado este estudio, fue el realizado en el proceso del convertidor BOF. Un indicador de buen funcionamiento del proceso es la concentración de óxido de hierro presente en la escoria al final del soplado, la cual determina en el equilibrio la cantidad de oxígeno disuelto en el acero. Con el nuevo software controlador este valor se logró disminuir, acercándose a los valores de las siderúrgicas top a nivel mundial, las que bordean el 20% de FeO en la escoria.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar una verificación del proceso y ver como estos cambios influyeron, de forma positiva, en el control de este problema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

Validar los cambios en el procesamiento del acero 1006 en el Departamento de Acería y Colada Continua, que desencadenaron en la disminución de gases disueltos en el acero y, por ende, en la disminución de defectos tipo porosidades en las palanquillas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar teóricamente las variaciones en la operación del convertidor BOF después del cambio de soplado en el proceso.
- Analizar la influencia del óxido de hierro alojado en la escoria formada, en la cantidad de oxígeno disuelto en el acero durante su tratamiento en la metalurgia secundaria.
- Validar el uso de agitadores electromagnéticos de molde en la colada continua, respecto de la disminución de los defectos observados.

Capítulo 2. Desarrollo Teórico

2.1 Descripción del proceso productivo

CAP Acero S.A. es una siderúrgica integrada, que a partir de materias primas: mineral de hierro, caliza y coque metalúrgico, este último obtenido en la Planta de Coque, produce arrabio por reducción del mineral en el alto horno, transforma ese arrabio en acero líquido en la acería y de éste se obtienen palanquillas de la Colada Continua, siendo estos productos semiterminados los que posteriormente se laminan, para entregar al mercado una gama de productos tales como alambrón, barras para molienda y barras hormigón.

A continuación se detallan cada una de las etapas del proceso siderúrgico de CAP Acero.

La primera etapa de este proceso, ilustrada en la figura 2, consiste en la recepción y preparación de las materias primas necesarias para la obtención de arrabio que básicamente son: mineral de hierro, caliza y carbón mineral. Este último se somete a un proceso de destilación seca realizado en la Planta de Coque, transformándolo en coque metalúrgico. Además, esta etapa considera la reducción del mineral de hierro para su transformación en arrabio el cual se realiza en el alto horno, cargando en su parte superior las capas de minerales de hierro, caliza y coque metalúrgico. Luego se le inyecta aire precalentado a 1000°C facilitando la combustión del coque, lo que genera elevadas temperaturas y gases reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, ocurriendo la transformación a arrabio (hierro líquido) y escoria. El arrabio es transportado en carros torpedo hacia la Acería.

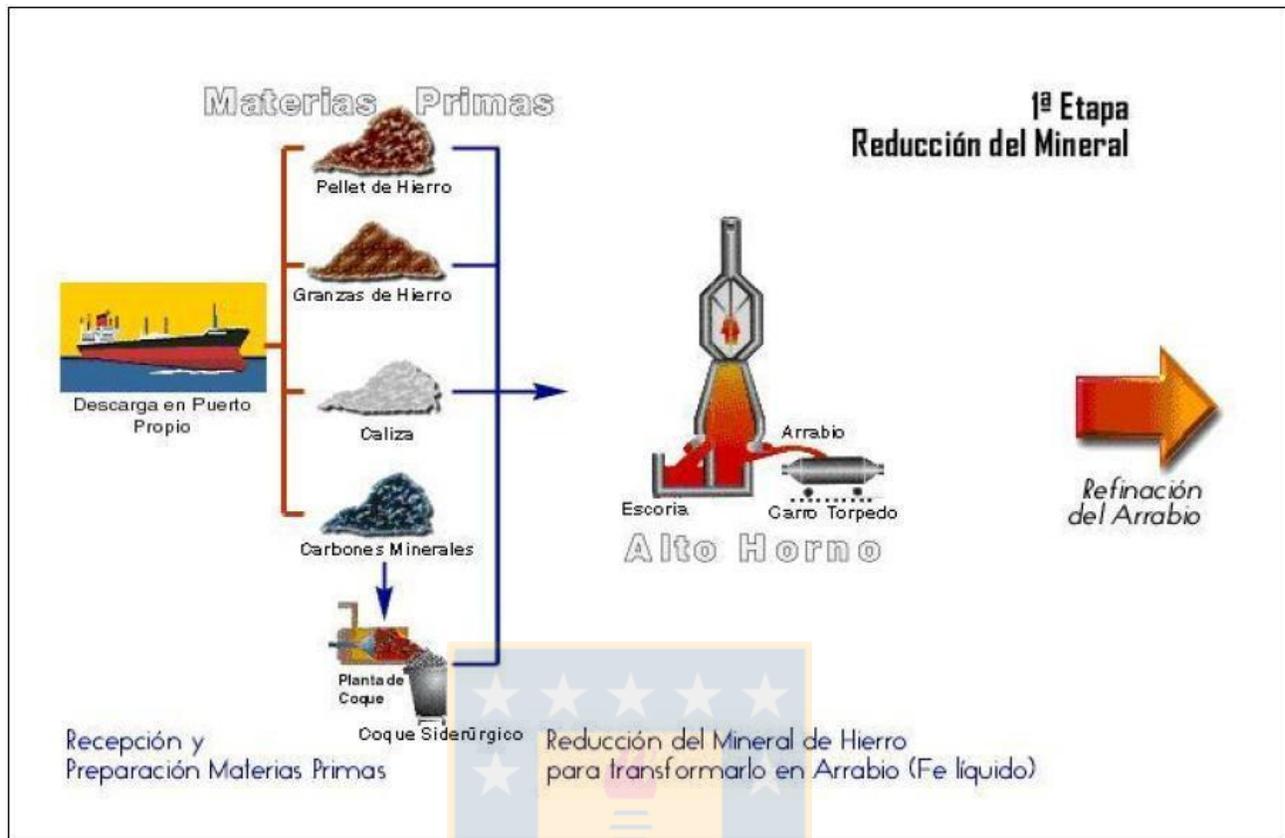


Figura 2: Primera etapa, reducción del mineral.²

La segunda etapa, figura 3, consiste en la refinación del arrabio para su transformación en acero. Éste se realiza en los Convertidores al Oxígeno (Basic Oxygen Furnace BOF) de la acería, en donde el arrabio proveniente del alto horno se carga en estos convertidores junto con la chatarra de acero y de hierro. Debido a la acción del oxígeno puro que se inyecta al convertidor, se combustiona el carbono, silicio y fósforo del arrabio. Todas estas reacciones son exotérmicas, permitiendo llegar a las temperaturas deseadas sin necesidad de agregar ningún combustible. Producto de la adición de cal se forma la escoria en que se fijan las impurezas oxidadas. Este acero líquido producido es recibido en cucharas en las que se obtiene la composición química deseada en la Estación de Ajuste, agregándole distintos elementos aleantes que entregan las características principales a los diversos tipos de acero. Una vez finalizada esta etapa el acero es transportado a la Colada Continua.

² Apuntes Siderurgia Dimet UdeC.



Figura 3: Segunda etapa, fabricación del acero.³

Como se observa en la figura 4, en esta tercera etapa el acero líquido de la cuchara, luego de un proceso de ajustes químicos y aporte térmico en la metalurgia secundaria en hornos de cuchara, es vaciado en una máquina de colada de palanquillas que corresponden a productos semiterminados. Estas palanquillas son transportadas a la unidad de laminación, que básicamente consiste en un proceso de transformación en caliente, por medio del cual y con uso de rodillos de laminación se modifica la forma de los productos, reduciendo la sección y aumentando el largo.

³ Apuntes Siderurgia Dimet UdeC.

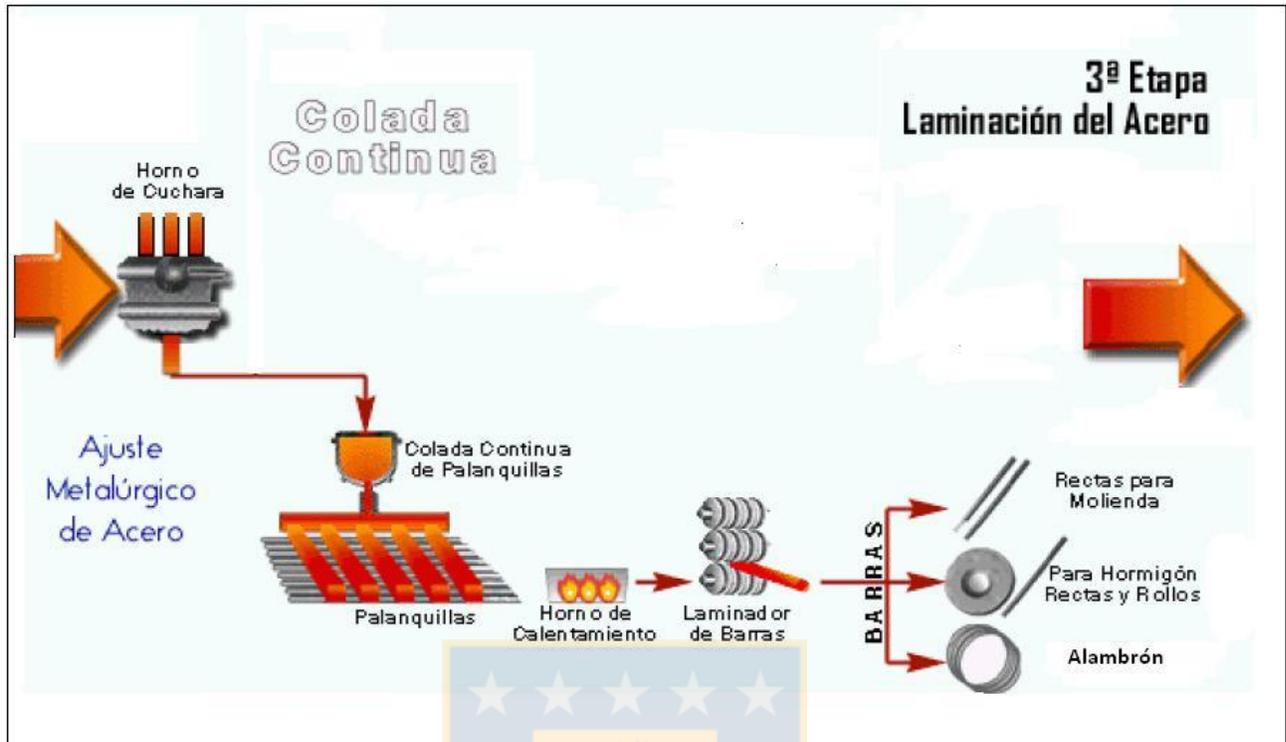


Figura 4: Colada y laminación del acero.⁴

Debido a que este estudio está enfocado a las variables de proceso que inciden en la palanquilla, a continuación se explicará en mayor detalle el proceso del Departamento de Acería y Colada Continua.

2.2 Departamento de Acería y Colada Continua

2.2.1 Convertidor BOF

El objetivo del proceso en el convertidor básico al oxígeno (BOF) es refinar el arrabio producido en el alto horno, previamente desulfurado, mediante la remoción del C y elementos indeseables en su composición, a través de la reacción con el oxígeno.

⁴ Apuntes Siderurgia Dimet UdeC.

En CAP Acero, el convertidor empleado es del tipo LD (Linz y Donawitz) y se cuenta con dos unidades, una en operación y la otra en espera, lista para operar.

Como se aprecia en la figura 5, éste posee forma de barril y está montado en muñones que le permiten rotar completamente alrededor de un eje horizontal. La carcasa de acero en su parte inferior es cerrada y cóncava, la parte central es cilíndrica y la parte superior cónica, que se enangosta concéntricamente hacia la boca. En la parte inferior del cono se ubica un tubo de sangría que posibilita la separación del acero de la escoria durante el sangrado de la hornada. La carcasa de acero está protegida por ladrillos refractarios.



Figura 5: Esquema del Convertidor BOF-LD⁵

⁵ (Primetal Technologies, 2015)

Las funciones principales del convertidor son:

- Descarburación (desde 4,7% a 0,07% aproximadamente)
- Controlar los niveles de azufre, silicio, fósforo, vanadio y manganeso.
- Optimizar la temperatura del acero (elevation de ~ 1350 a 1650°C), gracias al alto poder exotérmico de las reacciones de oxidación en el proceso.

El proceso completo consta de 7 etapas especificadas a continuación (Lucero, 2004):

- Carga de chatarra: La función de estas cargas es principalmente como carga fría, para contrarrestar en parte el calor producido por la oxidación del Si, Mn y P, los cuales elevan demasiado la temperatura del sistema, trayendo consigo problemas tales como:
 - Desgaste excesivo del refractario
 - Dificultad en la colada continua por exceso de fluidez
 - Perturbación en los equilibrios y desajustes en la composición
 - Aumento del consumo de O_2 en el soplado
- Carga de Arrabio: Se agrega el arrabio proveniente del alto horno, por la boca del convertidor mediante una cuchara de traslado.
- Soplado de oxígeno: Las funciones del oxígeno soplado en el convertidor son:
 - Oxidación de las impurezas presentes en el baño
 - Agitación de la mezcla acero-escoria con el fin de aumentar la interfase de reacción entre el metal y la escoria.

- Adición de escorificantes: Este proceso se realiza simultáneamente con el soplado de oxígeno (al inicio de éste). El fin de la adición de escorificantes es crear una escoria básica, proteger el refractario y controlar la temperatura.
- Fin del soplado: Al terminar el soplado, se toma una muestra del baño mediante una sub-lanza, para determinar la composición del metal (especialmente, porcentaje de carbono) y la temperatura del baño. En caso de no lograr los rangos requeridos, se procede a una etapa de resoplado.
- Sangrado: Cuando se alcanza la composición óptima del acero junto con su temperatura, se realiza el vaciado del acero. Debido a la diferencia de densidad, el acero queda bajo la escoria. Durante esta etapa se utilizan refractarios en forma de dardos, que flotan en la interfase acero-escoria para bloquear el tubo de sangría, una vez se haya sangrado todo el metal, posteriormente se gira el convertidor para colar hacia la cuchara. En esta etapa se agregan ferroaleaciones, con el fin de realizar un ajuste grueso de la composición y desoxidar.
- Escoriado: Una vez sangrado el metal, y solo conteniendo escoria, el convertidor se gira, eliminando por la boca del convertidor el remanente a la olla escoriera. Luego de esto, se está en condiciones de iniciar nuevamente el ciclo descrito.

En la figura 6 se aprecian algunas etapas del proceso, que van desde la carga del convertidor hasta el sangrado del acero.



a)

b)



c)

d)

Figura 6: Etapas del proceso de conversión; a) Carga de Chatarra, b) Carga de arrabio, c) Uso de dardo para sangrar acero, d) Sangrado del acero⁶

⁶ (CAP Acero, 2016)

2.2.2 Caracterización del Acero

El acero que se produce en CAP Acero responde a distintos requerimientos de la diversa cartera de clientes que adquieren sus productos. Cada tipo distinto de acero se denomina grado.

Los grados se crean a partir de la combinación de cuatro características; metalurgia (calmada, semicalmada o pseudo-efervescente), calidad (molienda, premium, electrodo o comercial), %C máximo y tipo de colada, las cuales poseen distintas cualidades.

El grado de acero a estudiar es de tipo RSS (rimming substitute steel) posee una metalurgia pseudoefervescente, calidad comercial, carbono máximo de 0,08% y colada para palanquillas.

Los denominados aceros tipo "Rimming substitute" (RS) provienen inicialmente de los aceros efervescentes, que corresponden a aceros que no han sido desoxidados por completo y colados en lingoteras. Durante la colada y después de ésta se produce una reacción entre el oxígeno y carbono disuelto en el acero desprendiéndose CO, lo que provoca efervescencia. En el enfriamiento, las impurezas se concentran en el interior y hacia la zona superior del lingote. La mayoría de las inhomogeneidades producto de la efervescencia se eliminan durante los procesos de laminación posteriores.

La microestructura final de los lingotes de acero efervescente presentan una zona externa con una muy buena calidad superficial y deformabilidad, como consecuencia del bajo contenido de carbono en esta zona.

El proceso de colada continua de acero condiciona a que éste no sea efervescente, razón por la cual se utilizan elementos desoxidantes como silicio, aluminio, calcio, manganeso que permiten estar en el límite inferior de la efervescencia del acero, generalmente se usan cantidades de aluminio para calmar el acero de manera de tener un producto dúctil. Lo anterior justifica la creación de los aceros sustitutos efervescentes o "rimming substitute".

2.2.3 Aspectos Fisicoquímicos de la producción de Acero

El proceso de refinación de arrabio para la producción de acero corresponde al control de los elementos de aleación para lograr una composición definida. Este control se logra mediante:

- a) La oxidación de las impurezas remanentes del proceso de producción de arrabio a partir de los minerales de Fe en el Alto Horno.
- b) La adición de elementos de aleación, la cual se realiza en una primera parte en la etapa de conversión y se termina en las estaciones de ajuste antes de pasar el acero a la colada continua.

El control de la composición final se logra mediante el correcto ajuste de las condiciones de equilibrio químico que se establece entre las especies disueltas en el Fe y el óxido correspondiente que forma parte de la escoria.

El concepto de control de proceso requiere por lo tanto conocer las condiciones de equilibrio por lo cual la descripción termodinámica del equilibrio químico entre las especies disueltas en el Fe y su componente en la escoria es la herramienta fundamental para cuantificar el proceso.

2.2.4 Química del proceso

La refinación del acero se caracteriza por el uso de oxígeno de alta pureza como agente refinador sobre la carga de arrabio, chatarra y fundentes. De esta combinación resulta un proceso autógeno y altamente exotérmico debido a las reacciones de oxidación que hacen que la temperatura del baño aumente aproximadamente 300-400°C, con lo que se obtiene un producto líquido formado por dos fases, acero y escoria con una temperatura cercana a los 1650°C.

En el hecho, la oxidación no ocurre directamente mediante el oxígeno, sino por intermedio de FeO, ya que al momento de insuflar el oxígeno, este se fijará prioritariamente al Fe debido a que se encuentra en mayor cantidad, para generar FeO

que va a disolverse en el baño y será allí reducido por las impurezas presentes. Las reacciones de mayor importancia que se producen en el proceso del convertidor se resumen a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2: Reacciones principales en el proceso de conversión.⁷

Reacción Química	$\Delta H_{1600^{\circ}\text{K}}(\text{kcal/mol})$	$\Delta H_{1900^{\circ}\text{K}}(\text{kcal/mol})$
$2\text{FeO} + \text{Si} \leftrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$	-144.7	-158.6
$5\text{FeO} + 2\text{P} \leftrightarrow 5\text{Fe} + \text{P}_2\text{O}_5$	-690.5	-691
$\text{FeO} + \text{Mn} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$	-34.6	-39.6
$\text{FeO} + \text{C} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{CO}$	35.2	29.74
$5\text{FeO} + \text{V} \leftrightarrow 5\text{Fe} + \text{V}_2\text{O}_5$	-285	-288.5

2.2.5 Reacciones durante la producción del acero

Durante la aceración y otros procesos de refinación oxidante, el oxígeno debe disolverse en el baño antes de reaccionar con las impurezas disueltas.

Reacción del hierro:

En ausencia de otros constituyentes formadores de escoria, el acero líquido puede disolver oxígeno hasta el punto en el que se forma el FeO líquido, que a 1600°C sucede para 0,23% de O. En presencia de óxidos formadores de escoria, la solubilidad es menor y la controla el equilibrio $\text{FeO}_{(l)} = \text{Fe}_{(l)} + \underline{\text{O}}$. Así, a 1600°C, $[\%O] = 0,23a_{\text{FeO}}$, en donde a_{FeO} es la actividad en la escoria coexistente en relación a FeO líquido puro y $\underline{\text{O}}$ denota oxígeno disuelto (Ghosh, 2000).

La actividad química del FeO en las escorias CaO-SiO₂-FeO se muestra en la figura 7.

⁷ (H. Alan Fine, 1993)

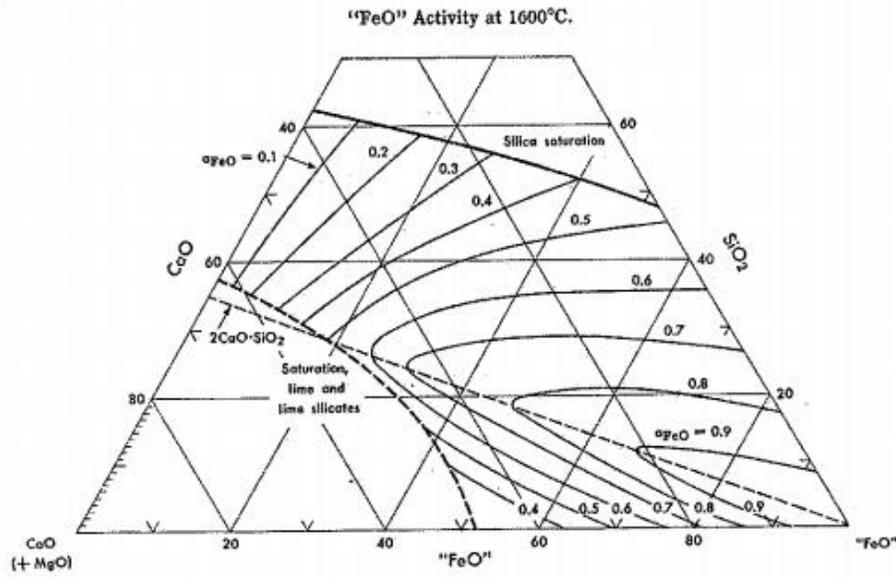


Figura 7: Actividad del FeO en escoria $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ en equilibrio con hierro a 1600°C ⁸

Reacción del carbono:

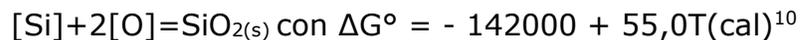
La reacción de aceración más importante es la oxidación del carbono de acuerdo con la reacción:



Para un rango de temperatura de 1700-2100 K

Reacción del silicio:

La oxidación del silicio está controlada por la reacción:



Para un rango de temperatura de 1700-2100 K

⁸ (V. D. Eisenhüttenleute, 1995)

⁹ (H. Alan Fine, 1993)

¹⁰ (H. Alan Fine, 1993)

Reacción del manganeso:

La oxidación del manganeso está controlada por la reacción:



Para un rango de temperatura de 1700-2100 K

2.2.6 Oxidación del hierro

El oxígeno tiende a formar óxidos estables con hierro, por lo tanto, el hierro fundido se satura con $[\text{O}]$ cuando el óxido comienza a formarse, es decir, cuando el hierro líquido y el óxido están en equilibrio. Este óxido, en su forma pura, se denomina Fe_xO , donde x es aproximadamente 0,985 a 1600 ° C. Para simplificar el análisis se tomó x igual a 1 y se designó este compuesto como FeO .

Para la reacción $\text{Fe}_x\text{O}(l) = x\text{Fe}(l) + [\text{O}]$

$$\log K_{\text{Fe}} = -2,604 + \frac{6150}{T} \quad 12 \quad (2.1)$$

Donde

$$K_{\text{Fe}} = \left\{ \frac{a_{\text{Fe}_x\text{O}}}{h_{\text{O}} \times [a_{\text{Fe}}]^x} \right\}_{\text{equilibrio}} \quad 13 \quad (2.2)$$

Aquí, a_{Fe} es la actividad de Fe en la fase metálica en la escala Raoultiana (aproximadamente 1), y $a_{\text{Fe}_x\text{O}}$ denota la actividad de Fe_xO en fase de óxido. Si el FeO no es puro y está presente en una escoria oxidada, entonces $a_{\text{FeO}} < 1$ y h es decir, la solubilidad de $[\text{O}]$ en equilibrio con la escoria, sería menor.

¹¹ (H. Alan Fine, 1993)

¹² (Ghosh, 2000)

¹³ (Ghosh, 2000)

2.2.7 Metalurgia Secundaria

Una vez terminado el proceso en los convertidores, el acero es vaciado a una cuchara y comienza así la llamada "Metalurgia Secundaria" o "Metalurgia en Cuchara". Mientras el acero es sangrado en la cuchara, pueden agregarse elementos de aleación y de desoxidación dependiendo del grado y composición final del acero antes del sangrado, por ejemplo, carbono, manganeso, silicio y aluminio. Posteriormente es llevado a la Estación de ajuste, donde se realizan tareas finales de refinación, aleación del acero, homogenización, remoción y modificación de inclusiones.

Los objetivos principales de esta etapa son (J. Enríquez, 2007):

- Ajuste preciso de la composición del acero
- Desoxidación
- Control de inclusiones: obtener la limpieza del acero, demandada por la aplicación final. Eliminación de inclusiones no metálicas, fundamentalmente óxidos.
- Control de la morfología de las inclusiones: dado que no es posible eliminar totalmente los óxidos indeseables en el acero, este proceso permite a los aceristas cambiar la composición y/o la forma de las inclusiones indeseables, residuales en el acero, de manera que sean compatibles con las propiedades mecánicas del acero final.
- Ajuste de temperatura, de la cual depende la estructura de solidificación y las propiedades del acero.

Durante el sangrado del acero se lleva a cabo la formación de una nueva escoria, la cual posee funciones muy importantes tales como:

- Proteger el acero de su interacción con la atmósfera, evitando la reoxidación del acero y disminuyendo la absorción de nitrógeno.

- Actuar como aislante térmico del baño, evitando pérdidas considerables de calor.
- Atrapar las inclusiones no metálicas desde el acero.
- Promover la desulfuración

Terminado el sangrado del acero, la cuchara es transportada hacia la Estación de Ajuste Metalúrgico. La mayor parte de las funciones principales de la Metalurgia Secundaria se llevan a cabo en la unidad llamada Horno de Cuchara (LF, Ladle Furnace). Actualmente en CAP Acero existen dos unidades de este tipo. Los electrodos permiten mantener un control exacto de la temperatura del acero calentándolo según sea la necesidad. Por el fondo del horno se inyecta argón a través de un tapón poroso que tiene como función agitar el metal líquido mecánicamente y así homogeneizar composición y temperatura. Esta agitación promueve también las reacciones metal-escoria. Finalmente, la tolva superior permite realizar las adiciones de aleantes y escorificantes.

En la figura 8 es posible apreciar la estructura y partes del horno cuchara.

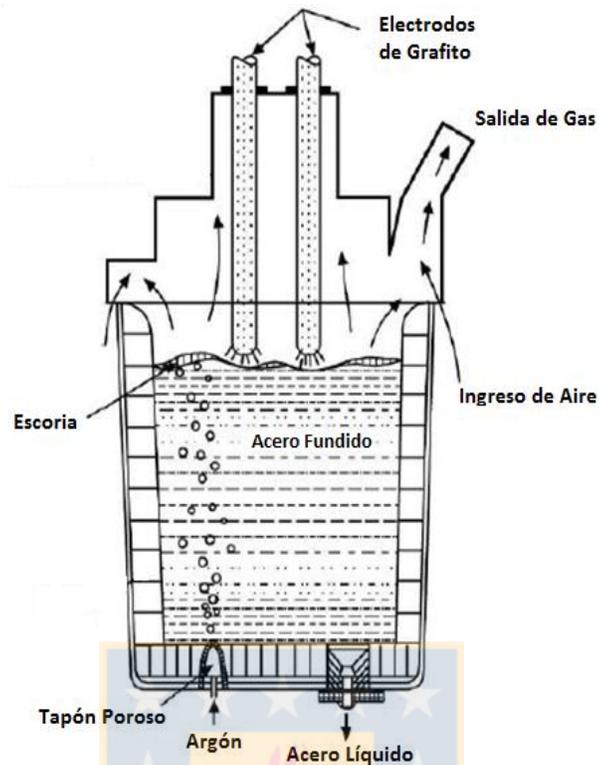


Figura 8: Horno Cuchara¹⁴

2.2.8 Desoxidación

Debido a la mínima solubilidad del oxígeno en acero sólido (I. Mamuzic, 2005), un exceso de este gas puede ocasionar defectos reaccionando con C, Mn, Si, etc., resultando en la formación de los blowholes (primariamente CO) e inclusiones oxidadas (FeO-MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , etc.). La evolución del CO también tiene una influencia significativa en la estructura y homogeneidad del metal fundido. Por la tanto, los niveles de oxígeno disuelto en el acero deben reducirse mediante la adición de fuertes formadores de óxido, tales como Mn, Si, Al y C (como ferromanganeso, ferrosilicio, aluminio granalla y coquecillo) en la cuchara.

El equilibrio carbono-oxígeno-monóxido de carbono, de gran importancia en la metalurgia secundaria, se representa en la figura 9, en la cual se ve que la zona de estabilidad del gas CO disminuye con respecto a la baja de la temperatura y presión.

¹⁴ (Ghosh, 2000)

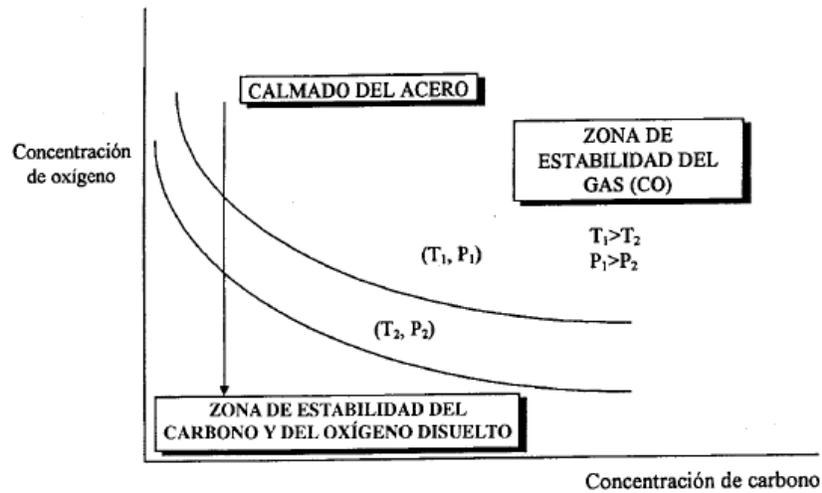


Figura 9: Efecto de la temperatura y la presión sobre la solubilidad del carbono y del oxígeno en el hierro líquido.¹⁵

Termodinámica de la desoxidación

Una reacción de desoxidación puede representarse como (Ghosh, 2000):



donde M denota al desoxidante, y M_xO_y es el producto de la desoxidación.

La constante de equilibrio (K'_M) para la ec. (2.3) es:

$$K'_M = \left\{ \frac{a_{M_xO_y}}{[M]^x [O]^y} \right\}_{\text{equilibrio}} \quad (2.4)$$

¹⁵ (Campos, 2009)

Un factor importante a considerar al momento de analizar esta constante, es su dependencia con la temperatura, la cual se puede representar como

$$\log \frac{1}{K'_M} = -\frac{A}{T} + B \quad ^{16} \quad (2.5)$$

Una mayor temperatura, favorece un mayor nivel de disolución del oxígeno en el acero.

Puesto que, en la desoxidación se busca reducir la concentración de oxígeno con la adición de tan poco desoxidante como sea posible, un aumento de temperatura afectaría negativamente a la termodinámica del proceso.

Los elementos utilizados para la desoxidación en este grado de acero son principalmente el ferrosilicio estándar y el aluminio granalla por su gran afinidad con el oxígeno.

2.2.9 Colada Continua

Posterior a su paso por la estación de ajuste metalúrgico, donde se afina la composición química, se obtiene la temperatura deseada, se limpia de impurezas y se ajusta su colabilidad, el acero es vaciado a las máquinas de colada. Ellas cuentan con moldes de cobre que son refrigerados por agua, produciéndose la solidificación.

La cuchara se dispone en la plataforma sobre el Tundish o artesa, el cual es un elemento distribuidor del acero líquido entre las diferentes líneas. Se procede a instalar la boquilla protectora en la cuchara, con la finalidad de que el acero no entre en contacto con el medio ambiente mientras es traspasado al Tundish. Una vez alcanzada la mitad de su capacidad (13 toneladas aproximadamente), se inicia el paso del acero a los moldes.

La máquina de colada continua de palanquillas cuenta con cinco líneas conformadas por tubos de cobre de sección cuadrada con refrigeración interna por agua. Posee un sistema de enfriamiento controlado a lo largo de la hebra con sprays

¹⁶ (Ghosh, 2000)

de agua y agitadores electromagnéticos, al comienzo y final de la hebra, para fomentar la expulsión de gases y evitar segregación en aceros de alto carbono. Una vez que se ha formado una piel suficientemente gruesa al interior del molde, la hebra comienza un recorrido curvo dentro de la máquina siendo sometida a la acción de rociadores de agua controlados de acuerdo a la velocidad de la máquina. Finalizada esta etapa, la hebra es enderezada mediante rodillos y cortada a una dimensión específica con sopletes de oxígeno propano, además de ser estampada con un número identificador. La palanquilla de dimensiones; 160 mm x 160 mm de sección y 7 metros de largo, es trasladada mediante mesas de empuje, mesas de rodillo y una mesa galopante hasta la zona de despacho, desde donde es cargada, mediante una grúa dotada de electroimanes, a carros de ferrocarril o camiones, de acuerdo a su destino final.



Figura 10: Esquema de máquina colada continua.¹⁷

2.2.10 Agitación Electromagnética en Proceso de Colada Continua.

Con el propósito de fomentar la liberación de gases, una buena homogeneización de la composición del producto y mejorar la microestructura, se comenzaron a utilizar los agitadores electromagnéticos. Factores como la composición

¹⁷ Manual colada continua CAP Acero.

química, condiciones de solidificación y la naturaleza del flujo de acero líquido en el molde, afectan la calidad de la superficie y la estructura interna del producto. La aplicación de la técnica de agitación electromagnética en el molde (MEMS) promueve la formación de una zona cristalina equiaxiada. Esto provoca el refinamiento de la estructura de solidificación, la reducción en el contenido de inclusiones y la mejora de la calidad de la superficie, sub superficie y de la estructura interna del producto (Sarna, 2013).

Principio de agitación electromagnética

Se sabe que un campo magnético alternante (B) (ya sea monofásico, bifásico o trifásico) aplicado a un conductor, ya sea sólido o fluido, inducirá una corriente eléctrica (j) en el conductor, esta se conoce como Fuerza de Lorentz, y está dada por:

$$F = j \times B \quad (2.6)$$

Debido a la fuerza de Lorentz, se genera un torque que da al acero líquido un movimiento rotatorio. El torque generado depende de la intensidad de corriente, número de devanados de la bobina, frecuencia y geometría del sistema.

Estos parámetros varían según el tipo de agitador. Por lo tanto, el campo magnético actúa como un dispositivo de agitación no intrusivo y, en principio, puede ser diseñado para proporcionar cualquier patrón de agitación deseado. El diseño, el tamaño y la posición del agitador, dependen de los datos de la máquina de colada continua, de los grados de acero a producir y de los parámetros de colada.

Los sistemas electromagnéticos de agitación crean un campo de inducción magnético giratorio, con una inducción de (B), la cual induce una corriente de Foucault (j) en una dirección perpendicular a (B), cuya velocidad es (v). La inducción (B) y la

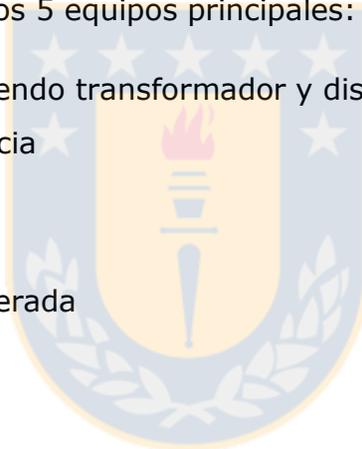
corriente (j) crean la fuerza electromagnética la cual funciona sobre cada unidad de volumen de acero y provoca un movimiento de agitación en el acero líquido.

El producto vectorial ($v \times B$) demuestra una conexión entre el campo electromagnético y el flujo del acero líquido. Las velocidades del acero líquido causadas por el EMS se encuentran en el rango de 0,1 m/s a 1,0 m/s¹⁸.

Principal equipamiento de un EMS

Un sistema EMS presenta estos 5 equipos principales:

- Fuente de poder incluyendo transformador y distribuidor de alta y baja tensión.
- Convertidor de frecuencia
- Agitador
- Monitor/Controlador
- Sistema de agua refrigerada



Tipos de sistemas EMS

El proceso de formación en líneas en la colada continua incluye la solidificación del acero líquido en el molde y en la zona de enfriamiento secundario (SCZ, secondary cooling zone). Los campos magnéticos rotatorios afectan la naturaleza de los flujos en el acero líquido e intensifican los procesos de transferencia de masa y de calor. El grado de influencia de la agitación electromagnética sobre la calidad en la línea depende de las características técnicas del EMS y de su disposición en el eje de flexión de la colada continua. Existen tres posibles aplicaciones del EMS en colada continua según la posición y los efectos requeridos sobre los productos colados. Los lugares de aplicación son:

¹⁸ (Sarna, 2013)

- El molde (M-EMS)
- Zona de enfriamiento secundaria SCZ (S-EMS)
- Zona final de solidificación (F-EMS).

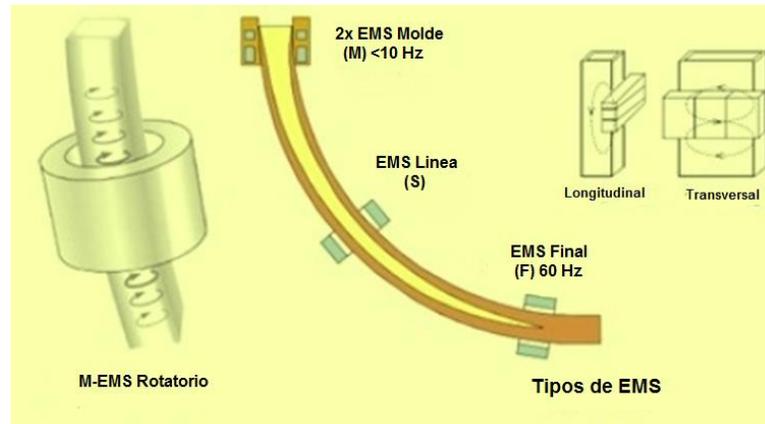


Figura 11: Tipos de EMS¹⁹

En el caso de CAP Acero, solo se utilizan los M-EMS Y F-EMS. Para el grado en estudio, se tiene sólo agitador electromagnético en el molde.

2.3 Defectos tipo porosidades

En estado fundido los metales suelen retener gran volumen de gases en disolución. Así por ejemplo, el hierro líquido disuelve hidrógeno, nitrógeno y oxígeno (que es el principal elemento disuelto en el acero).

Cuando la temperatura del fundido desciende desde el umbral de solidificación, se produce una rápida disminución de la solubilidad y los gases en disolución comienzan un proceso de nucleación para desprenderse del metal líquido, ya sea como monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua o hidrógeno, nitrógeno y oxígeno en forma de gases. Su desprendimiento prosigue a lo largo de todo el proceso de solidificación.

¹⁹ (Ispat Guru, 2009)

Cuando el desprendimiento de gases ocurre en un metal casi totalmente solidificado, que no permite su salida, los gases quedan retenidos: parte en los espacios interdendríticos y parte en el interior de cavidades de la masa metálica aún plástica. Estas cavidades, que reciben el nombre de porosidades, pueden ser periféricas o internas.

Las porosidades periféricas o pinholes, suelen ser alargadas en dirección perpendicular a la superficie de la palanquilla, a veces adoptan forma abocinada. En lo que se refiere a porosidades internas o blowholes, su forma más corriente es la redonda u ovalada.

Estudios muestran que las porosidades aparecen por aumento del contenido de gases N_2 , H_2 y CO (Pihura, 1999).

En este ámbito, el C del acero juega un papel importante respecto al contenido de oxígeno disuelto, debido a los equilibrios químicos que se establecen entre FeO , Fe , C y O , descritos en la sección 2.2.8.

En la figura 12 se observa la relación entre las concentraciones de C y O con respecto a las presiones del gas CO y su constante de equilibrio a 1823 K. Para la realización de ésta, se utilizó la energía libre de Gibbs descrita en la página 16, para un estado estándar Henriano.

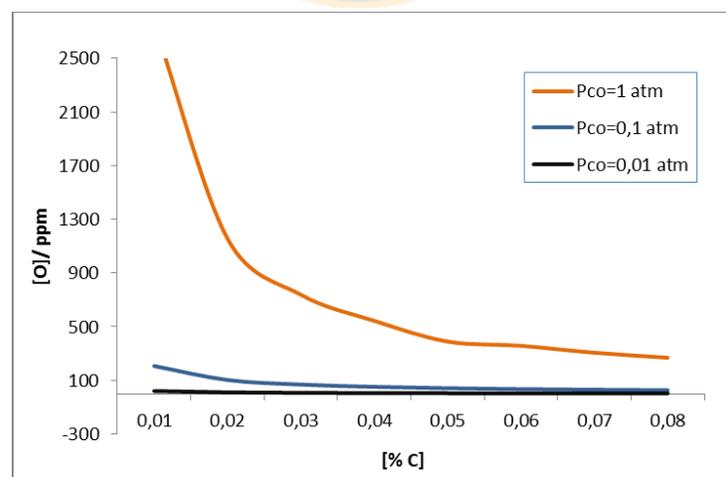


Figura 12: Equilibrio entre las concentraciones de $[C]$ y $[O]$ a diferentes presiones²⁰

²⁰ Elaboración propia.

A mayor temperatura el contenido de oxígeno en el acero líquido aumenta a medida que el %C disminuye. Así, por ejemplo, a 1600°C, el porcentaje de oxígeno en equilibrio para aceros con C superior a 0,3% es solo 0,005%; en tanto que para aceros de 0,2%C es de 0,02%O y para aceros de menos de 0,15% C las cantidades de oxígeno son considerablemente mayores (0,05 a 0,1%).

Cuando la presión de gas total de estos solutos enriquecidos en líquido interdendrítico exceden la presión externa local, burbujas de gas son generadas, dando como resultado la expulsión del líquido interdendrítico en las regiones vecinas y, por lo tanto, los pinholes y blowholes se forman durante la solidificación (2nd International Conference on Clean Steel, 1981; Ch.-Y. Chen, 2011)

$$P_{burbuja} = P_{H_2} + P_{CO} + P_{N_2} \geq P_{at} + P_f + P_s (\sim 0,03 \text{ atm}) \quad (2.7)$$

Donde

P_{at} : Presión atmosférica en la superficie del acero líquido (atm).

P_f : Presión ferrostática en el lugar de las porosidades (atm).

P_s : Presión debido a la tensión superficial (atm).

Durante el enfriamiento del metal líquido, la cantidad soluble disminuye gradualmente. Sin embargo hay una caída repentina de solubilidad en el cambio de fase de líquido a sólido, como se muestra en la figura 13.

La formación de los pinholes se producirá en la primera etapa de la solidificación.

Un promedio de 1,04 atm se toma como la presión total de gas crítica para el comienzo de la formación de porosidades subsuperficiales. Se encuentran a una distancia corta por debajo de la superficie donde la presión total está ligeramente por sobre la atmósfera en la colada continua.

La solubilidad crítica de hidrógeno, en el cambio de fase, se reduce a 6~10 ppm y para el nitrógeno es por debajo de 90 ppm.

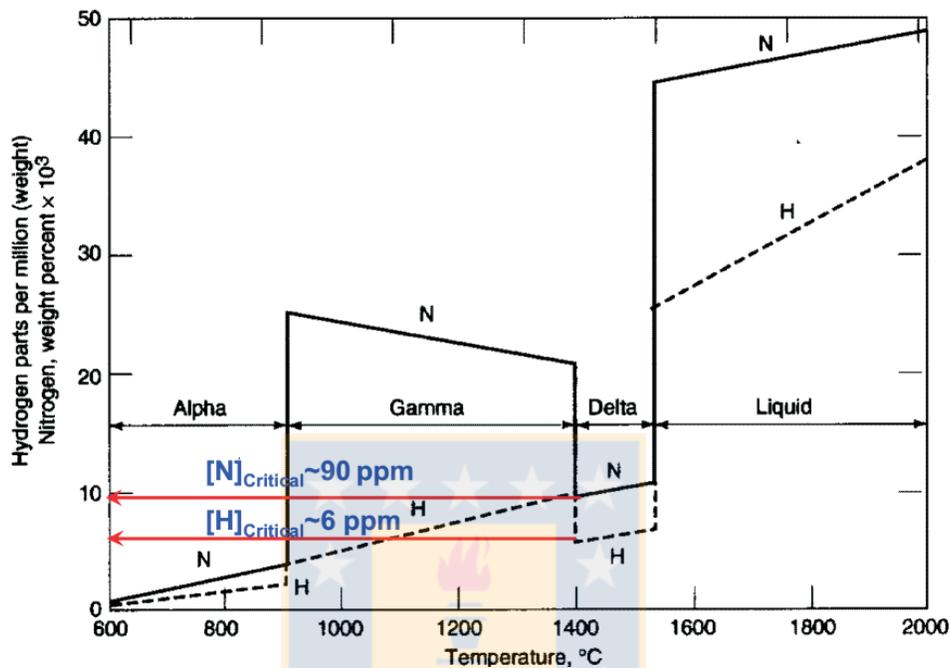


Figura 13: Solubilidad de hidrógeno y nitrógeno en hierro.²¹

La actividad crítica del oxígeno está definida como la actividad de oxígeno bajo la cual los pinholes no ocurren. La figura 14 muestra la variación de la actividad crítica de oxígeno a concentraciones de hidrógeno y nitrógeno dadas. La zona afectada por pinholes está siempre localizada muy cerca de la superficie de la palanquilla. Una baja actividad de oxígeno, influye en una longitud menor de los pinholes; la actividad crítica corresponde al mínimo de la curva para la cual la longitud de los pinholes es igual a cero.

²¹ (R.J. Fruehan, 2005)

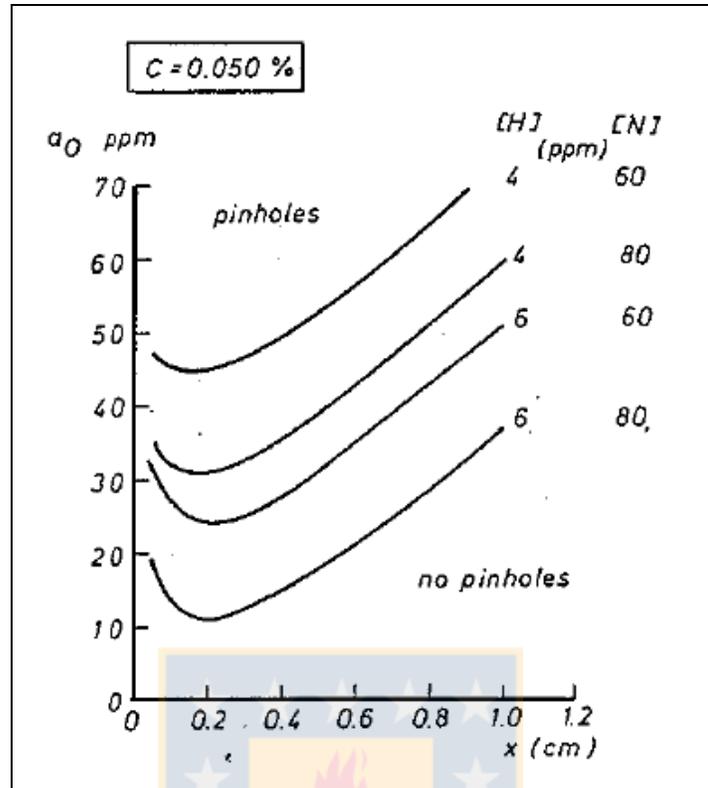


Figura 14: Influencia del contenido de hidrógeno y nitrógeno en la ocurrencia de pinholes y su máxima longitud en función de la actividad del oxígeno.²²

2.3.1 Hidrógeno

Como vimos anteriormente (figura 14) el hidrógeno es el gas más influyente en la formación de pinholes, debido que una menor concentración de este elemento provoca una alta presión parcial la cual incide en la formación de porosidades.

En la figura 15, se aprecian los contenidos de hidrógeno en equilibrio con el hierro a diversas temperaturas. Se observa que el hierro puro fundido a 1539°C puede disolver 0,0025% de hidrógeno. La solubilidad aumenta al elevarse la temperatura del metal fundido. Al solidificarse el hierro a 1539°C disminuye bruscamente la solubilidad desde el 0,0025% en estado líquido hasta 0,0008% en estado sólido. Si se sigue enfriando, disminuye aún más la solubilidad, la que a temperatura ambiente es de sólo 0,00012% (1,2 ppm).

²² (2nd International Conference on Clean Steel, 1981)

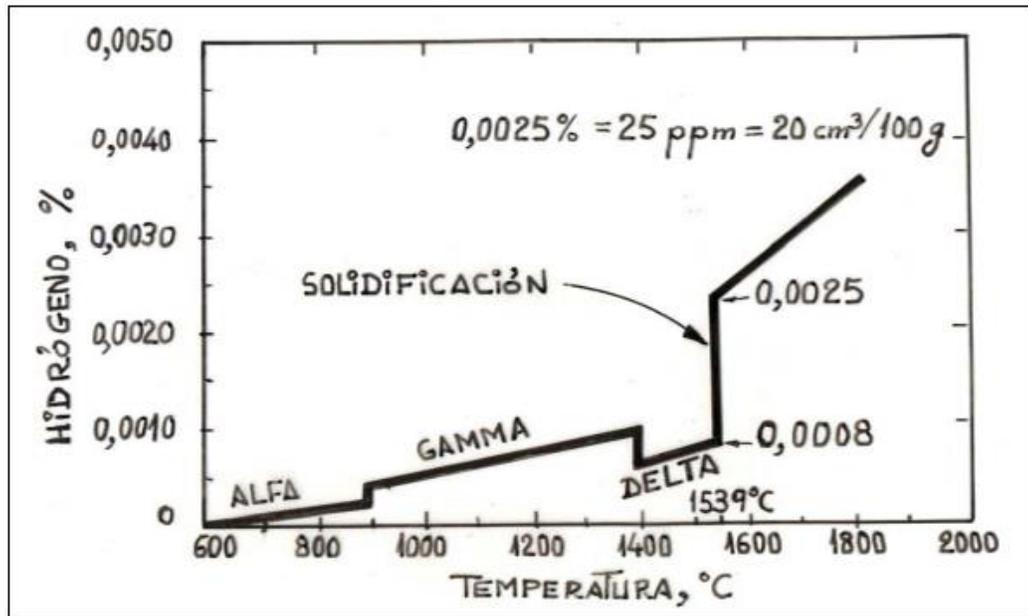


Figura 15: Solubilidad de hidrógeno en equilibrio con hierro fundido.²³

2.3.2 Nitrógeno

El nitrógeno en ocasiones origina dificultades en los aceros por comunicarles fragilidad y reducir la ductilidad. En estado líquido, el acero puede llegar a contener hasta 0,0450% de nitrógeno. El contenido de este gas en equilibrio con el hierro líquido a 1539°C es de 0,0390% (figura 16). Al bajar la temperatura esta solubilidad pasa a ser de sólo 0,0105%. A 1400°C es de 0,0080%. En el hierro gamma la solubilidad es bastante mayor que en el hierro delta; varía de 0,0210% a 0,0250%.

²³ (J. Enríquez, 2007)

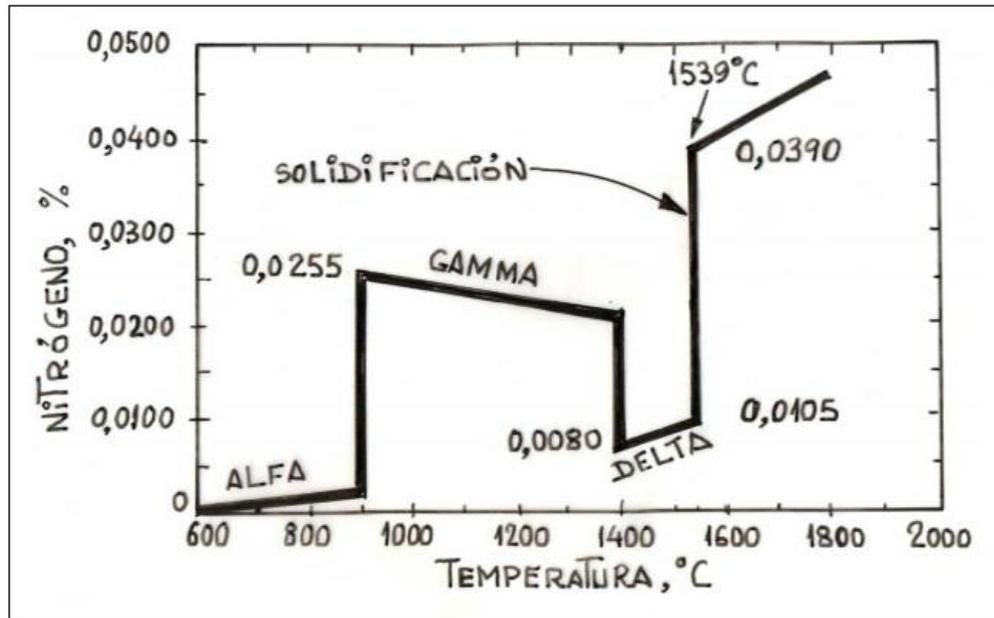


Figura 16: Solubilidad de nitrógeno en equilibrio con hierro fundido.²⁴

Diversos estudios han establecido que las causas del aumento de las concentraciones de hidrógeno y nitrógeno son (R.J. Fruehan, 2005):

- a) Las ferroaleaciones adicionadas para modificar la composición del acero líquido tienen impurezas inherentes de nitrógeno, como es el caso del ferromanganeso medio carbono, el cual incrementa el contenido de nitrógeno en el baño después de adicionada esta ferroaleación.
- b) Durante el sangrado del acero desde el convertidor a la cuchara, ocurre absorción de nitrógeno e hidrógeno desde el aire entrante debido a la agitación del baño. El grado de captación de hidrógeno depende en gran medida de la presión parcial del vapor de agua en el ambiente, dependiendo de la temperatura y la humedad relativa. Altos contenidos de humedad en el ambiente es una condición favorable para una mayor captación de hidrógeno.

²⁴ (J. Enríquez, 2007)

- c) Por la agitación con argón, mientras el acero se encuentra en la cuchara, el gas inerte que se escapa por la parte superior desplazando la capa de escoria forma un ojo de argón, por el cual el acero queda expuesto a la atmósfera y propicia una captación, aunque mínima, de hidrógeno y nitrógeno.

2.4 BOF Calculator

La anterior plataforma informática controladora de la etapa de conversión era el software Refinox (programa de elaboración propia en CAP Acero), el cual abarcaba desde la carga del convertidor, sus requerimientos de arrabio y carga fría y oxígeno necesario para la oxidación de impurezas, hasta la masa de acero a obtener y sus ferroaleaciones respectivas al grado que se debían agregar en la etapa de vaciado del convertidor.

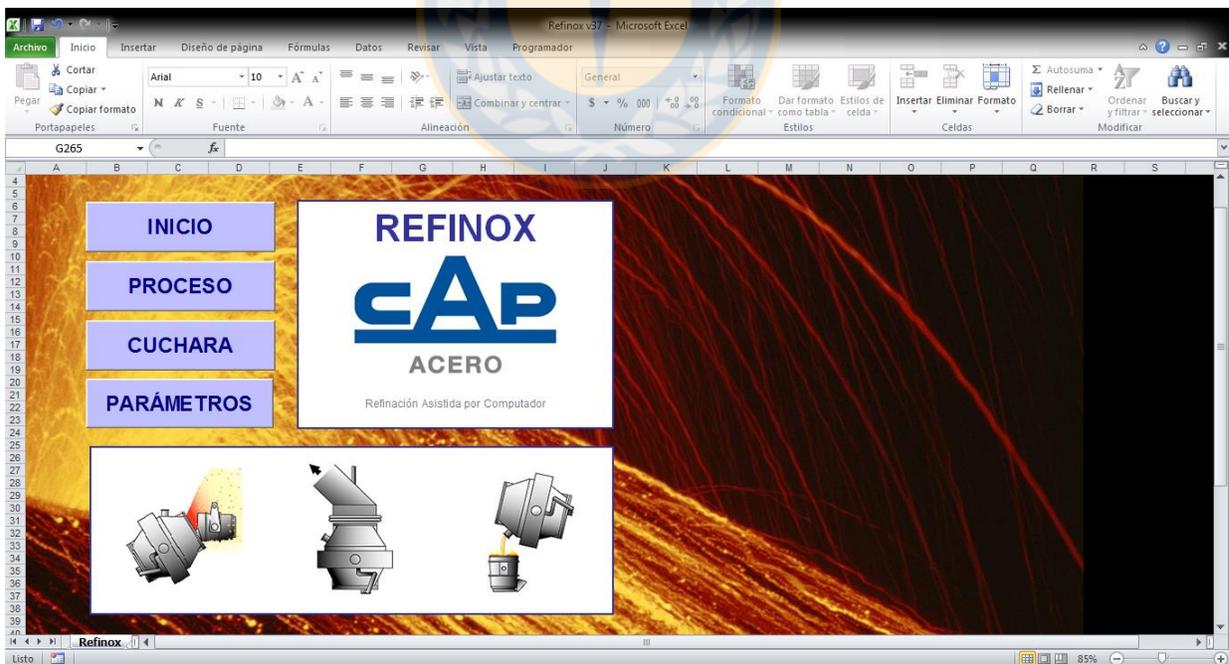


Figura 17: Pantalla de inicio, plataforma Refinox.²⁵

²⁵ Software Refinox, CAP Acero.

Esta plataforma presentaba diversos inconvenientes al momento de operar, ya que el cálculo de las distintas hornadas se realizaba según el arrabio y carga fría del que se disponía, no considerando cuanto acero se requería fabricar. Este problema se logró solucionar con la implementación del nuevo software controlador.

El BOF Calculator elaborado por Smart Steelmaking en Linz, Austria, es un modelador del proceso del convertidor BOF que se adapta según las necesidades y parámetros de operación de cada planta.

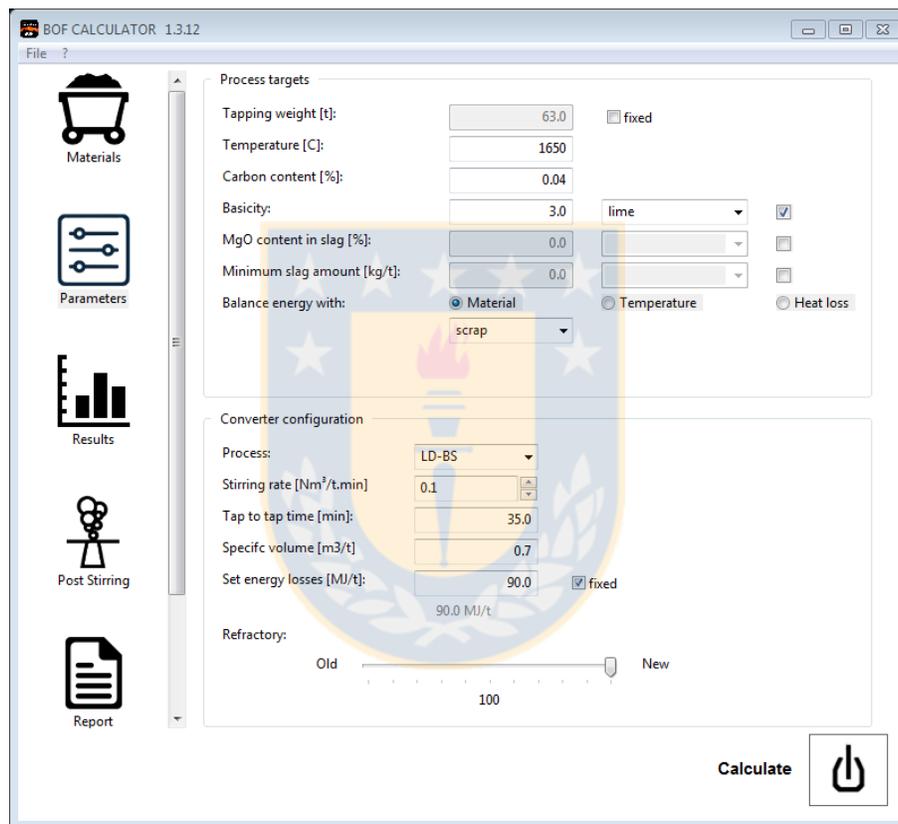


Figura 18: Pantalla de "parámetros" en BOF Calculator.²⁶

Entre sus funciones se encuentran el balance automático de energía con cargas de refrigerante y temperatura final del baño, cálculos para la basicidad objetivo en la escoria, editor de ecuaciones para personalizar el modelo del proceso, consideración de 30 elementos en el cálculo, incluyendo los comúnmente llamados elementos residuales, entre otras. Un ejemplo de esto se puede apreciar en la figura 19, la cual

²⁶ Smart Steelmaking, 2016.

representa los balances realizados por el software de los elementos principales del proceso, como son el Fe y el O.

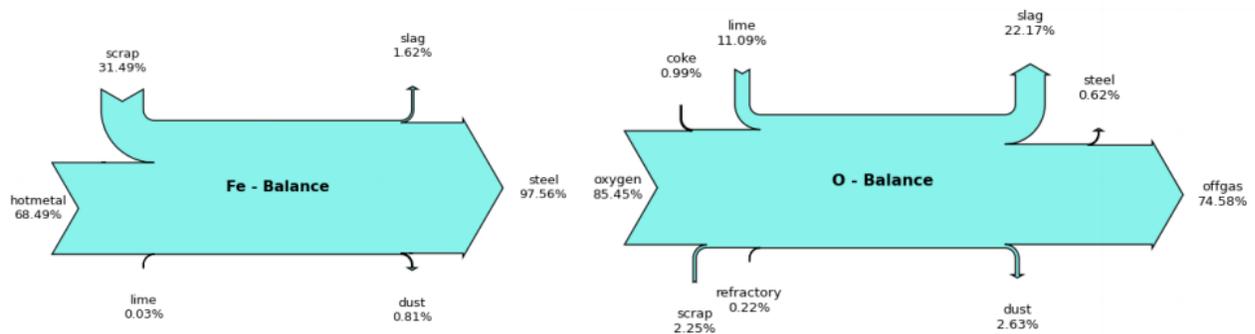


Figura 19: Balances de materia elaborados por BOF Calculator.²⁷

El cambio importante de este nuevo software respecto del anterior, fue la personalización del proceso. En el BOF Calculator se opera según la cantidad de acero requerida para la hornada. Se añade la masa de acero, temperatura necesaria al fin del soplado, porcentaje de carbono meta, y se obtienen las cargas del convertidor y el oxígeno necesario para lograr la hornada con sus especificaciones requeridas.

Un punto importante para la adquisición del nuevo software fue la disminución en el óxido de hierro en la escoria, el cual durante su periodo de operación con la plataforma Refinox se encontraba entre 32 a 34%, valor que desde las primeras operaciones del nuevo software se logró disminuir.

²⁷ Smart Steelmaking, 2016

Capítulo 3: Análisis de datos operacionales, de producción y pruebas industriales.

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo se basó en tres etapas distintas; en primer lugar se realizó un balance de masa estático en el convertidor BOF, tomando datos discretos de operaciones anteriores obtenidos de la plataforma online de la planta. Tomando como datos de alimentación el arrabio, chatarra y fundente, y según una serie de supuestos, obtener el acero y escoria con sus respectivas composiciones químicas, aparte del oxígeno necesario para la generación de todas las reacciones presentes durante el proceso.

En la segunda etapa de metalurgia secundaria se analizó estadísticamente los datos resultantes de la primera etapa contrastándolos entre dos periodos de tiempo separados por el cambio de software controlador del convertidor.

En la última etapa se realizaron pruebas industriales para verificar la real utilidad de los agitadores electromagnéticos de molde en la máquina de colada continua, en cuanto a eliminación de gases residuales luego de las variaciones realizadas al procesamiento del acero.

3.1. Uso de Softwares

Para el procesamiento de los datos, se utilizaron los softwares HSC Chemistry y Microsoft Excel. El primero de ellos permitió contar con una amplia base de datos, desde pesos moleculares, hasta datos termoquímicos, con el fin de facilitar el posterior análisis de los datos Planta en la plataforma de Microsoft Excel.

3.1.1. Procesamiento de Datos

Los datos base para la realización de los balances de masa, se obtuvieron de la plataforma M.E.S. (Manufacturing Execution System) la cual es un sistema de control para gestionar y monitorear los procesos de toda la planta. El MES realiza un seguimiento de toda la información de fabricación en tiempo real, alimentándose con los datos de todas las divisiones de CAP Acero. Estos datos son ordenados según fecha, número de hornada y grado del acero, y nos proveen de la información necesaria para su posterior análisis estadístico en Microsoft Excel.

3.2. Balance en el Convertidor BOF

Considerando datos reales y teóricos, se realizó el balance de masa del proceso BOF. Para realizar el balance se deben efectuar dos etapas:

1.- Etapa de Diseño: Estimación de la eficiencia de las reacciones, perdidas menores normalmente ignoradas y evaluación del balance de materia exacto.

2.- Etapa Operacional: Se realizan balances teniendo como bases análisis de muestras tomadas directamente desde la planta, con el objetivo de mantener un control del proceso y evaluar su eficiencia.

Conservación de la Materia

En cálculos estequiométricos, la base de todo balance de materia, es la ley de conservación de la masa, la cual establece que *"En un sistema dado, no se puede crear ni destruir materia (no aplicable a reacciones nucleares)"*. En este caso, significa que el peso de los productos de una reacción es igual al peso de los reactantes, lo cual no es necesariamente igual para un proceso.

En términos generales se tiene que:

$$\text{Masa entrada} = \text{Masa salida} + \text{Masa acumulada} \quad (3.1)$$

Dado que el balance se realizó solo en el convertidor, éste se considera un sistema Batch, por lo tanto:

$$\frac{\text{Masa entrada}}{\text{Batch}} = \frac{\text{Masa salida}}{\text{Batch}} \quad \text{Proceso Batch} \quad (3.2)$$

Dos cosas importantes a tener en cuenta en el balance de materia son: debe haber información suficiente para considerar el balance por componentes o balance de masa total y la información disponible dependerá de la situación del proceso.

Para plantear de buena forma el balance de materia se debe seguir los siguientes pasos: Definir el sistema, dibujar un diagrama de flujo del sistema mostrando todos los flujos de entrada y salida, definir una base de cálculo y escribir las ecuaciones de balances y restricciones impuestas, teniendo cuidado de plantear solo ecuaciones independientes.

El sistema que se analizó fue el convertidor BOF. Sus flujos de entrada y salida están representados en la figura 20.

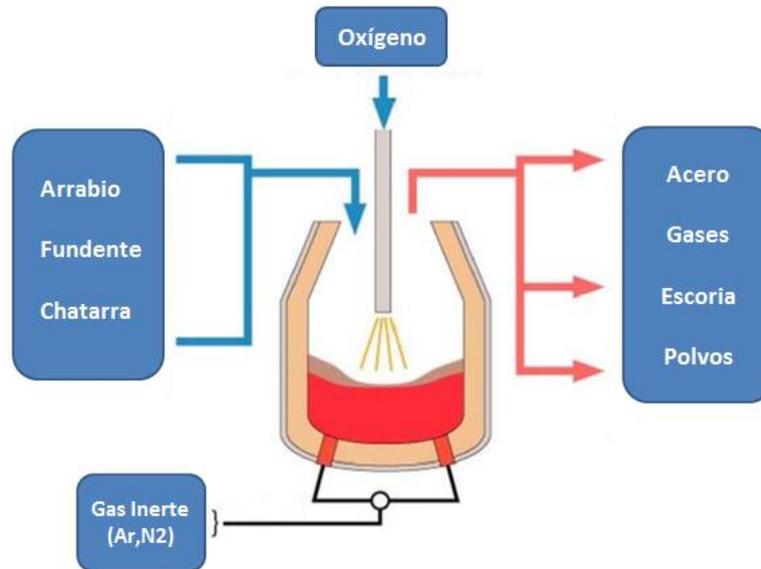


Figura 20: Flujos de entrada y salida en el convertidor BOF

A modo de determinar si el sistema de ecuaciones planteado en el balance de materia tendrá una solución consistente, se debe calcular los grados de libertad. Las variables independientes determinadas por los flujos másicos de entrada y salida son:

- F_{arrabio} : Fe, C, Mn, Si, S, V, P y Al
- F_{chatarra} : Fe, C, Mn, Si, S, V, P, Ca, Ti, O, Al y Mg
- $F_{\text{oxígeno}}$: O
- F_{cal} : Fe, Mg, Ca, Si, Al, S, P, C y O
- F_{dolomita} : Ca, Mg, Si, Al, Fe, S, P, C y O
- F_{acero} : Fe, C, Mn, Si, S, V y P
- F_{escoria} : Fe, Mn, Si, S, V, P, Al, Mg, Ti, Ca y O.
- F_{gases} : C, O y S.
- F_{polvos} : Fe, Si, P y O

En este caso tenemos 64 variables por lo que se necesitan una cantidad mayor o igual a este valor, de relaciones adicionales o variables independientes especificadas para la resolución del sistema de ecuaciones.

Las ecuaciones definidas son:

- Ecuaciones de composición de los flujos, 1 para cada flujo másico (8 en total sin contar el oxígeno)
- $\sum Elemento_{entrada} = \sum Elemento_{salida}$ con el fin de preservar el principio de conservación de la masa. Con 12 elementos involucrados, se tienen 12 ecuaciones.

- $C_{cal} + C_{dolo\ cruda} + C_{chatarra} + C_{arrabio} = C_{acero} + C_{gases}$
- $Fe_{arrabio} + Fe_{chatarra} + Fe_{cal} + Fe_{dolo\ cruda} + Fe_{mineral} = Fe_{Acero} + Fe_{escoria} + Fe_{dust}$
- $Si_{arrabio} + Si_{chatarra} + Si_{cal} + Si_{dolo\ cruda} + Si_{dolo\ calc.} + Si_{mineral} = Si_{acero} + Si_{escoria} + Si_{dust}$
- $Mg_{cal} + Mg_{dolo\ cruda} + Mg_{dolo\ calc.} + Mg_{mineral} = Mg_{escoria}$
- $P_{arrabio} + P_{chatarra} + P_{cal} + P_{dolo\ cruda} + P_{dolo\ calc.} + P_{mineral} = P_{acero} + P_{escoria} + P_{dust}$
- $Al_{chatarra} + Al_{cal} + Al_{dolo\ cruda} + Al_{dolo\ calc.} + Al_{mineral} = Al_{escoria}$
- $Mn_{arrabio} + Mn_{chatarra} = Mn_{acero} + Mn_{escoria}$
- $Ca_{cal} + Ca_{dolo\ cruda} + Ca_{dolo\ cal.} + Ca_{mineral} + Ca_{chatarra} = Ca_{escoria}$
- $S_{cal} + S_{dolo\ cruda} + S_{dolo\ calc.} + S_{chatarra} + S_{arrabio} = S_{acero} + S_{escoria} + S_{gases}$
- $V_{arrabio} + V_{chatarra} = V_{acero} + V_{escoria}$
- $Ti_{chatarra} = Ti_{escoria}$
- $O_{puro} + O_{dolo\ cruda} + O_{chatarra} + O_{cal} = O_{escoria} + O_{gases} + O_{polvos}$

- $Fe_{acero} = 0,9766 \times Fe_{entrada}$
- $Fe_{escoria} = 0,0165 \times Fe_{entrada}$
- $Fe_{polvo} = 0,0069 \times Fe_{entrada}$
- $Si_{polvo} = 0,03 \times Si_{entrada}$
- $P_{polvo} = 0,03 \times P_{entrada}$
- $n_{CO} / n_{CO_2} = 2,4$

Las variables independientes especificadas son:

- Se conocen los 5 flujos másicos de entrada, con sus respectivas composiciones, lo cual corresponde a 39 datos.

En resumen, tenemos 64 variables referentes a los flujos de entrada y salida, de esos, 39 datos de entrada conocidos, 8 ecuaciones de composición de los flujos, 12 ecuaciones de balance por elemento y 6 relaciones para tener el cálculo completo.

Calculando los grados de libertad tenemos:

$$G.L. = V - R \rightarrow 64 - 26 - 39 = -1$$

Por lo que nos sobre una ecuación para resolver adecuadamente el balance de masa, la cual en este caso es la composición de flujo relativo a los polvos. Finalmente:

$$G.L. = 64 - 25 - 39 = 0$$

Con lo que el balance de masa es posible de resolver.

La composición química de los tipos de chatarra y adiciones, se especifican en los Anexo C y D y ya vienen tabuladas en el modelo.

Para realizar correctamente los cálculos del balance de masa, se debieron fijar distintos supuestos, los cuales fueron:

- Para el estudio, se tomaron solo hornadas sin resoplado.
- Del Fe elemental total de entrada, 1,65% se va a la escoria y 0,69% se va por el colector de polvos, ambos en forma de óxido de hierro. Estos valores fueron recogidos de la base de datos del software BOF Calculator, los cuales son estimados de la operación.
- Del Si y P entrantes, en ambos casos, un 3% se va por el colector de polvos en forma de óxido de Si y óxido de P respectivamente.
- Se planteó una relación de $n(\text{CO})/n(\text{CO}_2)=2.4$, (CAP Acero, 2016)²⁸
- Del azufre total de entrada, 99,5% se va como CaS y 0,5% egresa como $\text{SO}_{2(g)}$

²⁸ Informe de medición isocinética en chimenea acería CAP, 2016

- El volumen de entrada es igual al de salida en el caso de los gases agitadores ($N_{2(g)}$ y $Ar_{(g)}$), considerando que son inertes y no reaccionan.
- Se considera una eficiencia de 100% del O_2 soplado.

3.3 Balance en la Metalurgia Secundaria

Con el propósito de realizar una trazabilidad con respecto a los resultados obtenidos del balance de masa en el convertidor BOF, se analizó el tratamiento del acero desde su sangrado a la cuchara, la llegada a la estación de ajuste, su refinación y despacho hacia la máquina de colada continua.

En la etapa de sangrado, debido al alto nivel de oxígeno presente en el acero luego del proceso de conversión, se realiza el calmado parcial del acero y preparación de la nueva escoria. Para el grado estudiado se desoxida con:

- 40 kg de Aluminio Granalla (cantidad fija para cada hornada)
- Ferrosilicio 75% estándar (con 75% de Silicio en su composición)

Debido a que este grado es calmado al silicio, se debe controlar el contenido de aluminio teniendo en consideración que la concentración máxima permisible es de sólo 0,003%. La reoxidación del baño, la reducción de algunos elementos en la escoria, y considerando que la cantidad de ferrosilicio añadido en el sangrado sólo considera el oxígeno disuelto después de la conversión, justifican el uso de esa cantidad de aluminio por su alto poder desoxidante (determinada experimentalmente según la experiencia en el convertidor).

Junto con los elementos desoxidantes, se agrega ferromanganeso medio Carbono y ferrosilicio como elementos aleantes, para obtener manganeso y silicio respectivamente.

Para el cálculo de los elementos aleantes se hace uso de la siguiente ecuación:

$$m_{adiciones} = \frac{100 \times \Delta(\%X)m_{cuchara}}{Ley \times Rendimiento} \quad (3.8)$$

Con $\Delta(\%X)$: aumento requerido en %peso (es decir, $(\%X_{objetivo} \times F.C) - \%X_{acero}$)

El $\%X_{objetivo}$ corresponde al % del elemento necesario en el acero según la composición del grado multiplicado por un factor de corrección (F.C en la ecuación 3.8), debido a la reactividad de estos elementos durante su ajuste. Por ejemplo el factor de corrección para el silicio está en 1.1, es decir que se le agrega un 110% del silicio necesario, ajustándolo sobre el tope, debido a que producto de la agitación constante del baño, el silicio continua reaccionando con el oxígeno del sistema, yéndose a la escoria como SiO_2 y provocando una constante baja en su porcentaje como aleante.

Distinto es el caso con el manganeso, el cual se ajusta al mínimo, con un factor de corrección de 0.9, siempre procurando no exceder el límite máximo de este elemento en la composición.

El procedimiento para el cálculo del ferrosilicio como desoxidante está dado según la reacción del silicio con el oxígeno:



Se tiene que:

$$m_{FeSi\ 75} = \frac{PM_{Si}}{2PM_O} \times m_{acero} \times \frac{Ppm\ O\ disuelto}{1000000} \times Ley \times Rendimiento \quad (3.10)$$

La ley y el rendimiento de estas adiciones se encuentran tabulados

Tabla 3: Descripción de las adiciones usadas en la metalurgia secundaria.²⁹

Material	Elemento	Ley	Rendimiento
FeMn mC	Mn	81%	97%
	C	1,5%	
FeSi 75	Si	75%	100%
	Al	1,5%	
Aluminio	Al	96%	100%

Luego en su llegada a la estación de ajuste, la cuchara se somete al procedimiento establecido para poder refinar el acero de manera eficiente.

- Se somete a calentamiento con el fin de licuar la escoria, la cual en el traslado del convertidor hacia la estación de ajuste tiende a solidificarse. Se debe calentar mediante un procedimiento específico, porque al ser un grado bajo carbono, el contacto de los electrodos de grafito con el baño provoca una reacción con la cual aumenta el %C en el acero (ver anexo F)
- Medición de Oxígeno y Temperatura
- Toma de muestras de acero y escoria

Con los datos de composición química, ppm de oxígeno disuelto, composición de la escoria y temperatura, los operadores en la estación de ajuste deciden la cantidad de ferroaleación a agregar, ya sea con el fin de desoxidar o alcanzar los rangos óptimos de aleantes, se realiza el ajuste fino y se continúa calentando con el arco eléctrico para homogeneizar el baño y lograr la temperatura de despacho (50°C sobre la temperatura liquidus aprox.) para poder despachar la cuchara a la colada continua.

El empape se define como la capacidad del acero de perder temperatura en su traslado desde la estación de ajuste hacia la máquina de colada. Cuando la pérdida es superior a 1,4°C por minuto (siendo lo normal 1°C por minuto), se considera que la cuchara tiene mal empape y se despacha a una temperatura de +55°C aprox. sobre la temperatura liquidus.

²⁹ Manual de Operaciones EAM

El tiempo mínimo de tratamiento para este grado es de 40 minutos, tiempo durante el cual se debe controlar estrictamente los tipos de burbujeo según etapa de tratamiento (ver anexo F).

3.4 Uso de Agitadores Electromagnéticos de Molde (M-EMS) en la Colada Continua

La finalidad del uso de los M-EMS en las líneas de la colada continua es homogeneizar el acero y la desorción de los gases que llegaron hasta esta etapa, anterior al semiterminado.

Para validar su uso, se realizaron pruebas experimentales para comprobar la incidencia que tenía el colar con M-EMS o sin ellos.

En primera instancia, se realizó una prueba preliminar, muestreándose 2 palanquillas de una hornada del grado 1006 estudiado, a las cuales mientras se colaba, se le apagaron los agitadores electromagnéticos.

Se cortaron trozos de palanquilla de 150 mm aprox. de longitud y fueron despachadas desde la Acería a Ensayos Físicos de IDAC en un capacho de muestras mediante un montacargas. Posterior a su descarga, se identificaron, y se realizaron los cortes transversales para obtener macrografías de 25 mm de espesor, teniendo muestras de cabeza, medio y cola listas para su tratamiento y posterior análisis en el taller metalográfico (ver anexo H).

Debido a los inesperados resultados de esta primera prueba (ver sección 4.3), se decidió realizar una segunda prueba que abarcara una mayor cantidad de muestras. En primera instancia se analizó una sola línea, y en la segunda prueba se recurrió a detener los M-MEMS de 2 de las 5 líneas operativas para obtener palanquillas sin la acción de los agitadores electromagnéticos.

Mediante inspección visual en el taller metalográfico, se puede determinar la aparición de posibles porosidades, cantidad y longitud.

En el caso de porosidades, los metalógrafos sólo clasifican las ubicadas en zonas próximas a la superficie de la palanquilla (comúnmente perpendiculares a las caras) es decir, los pinholes. Dado que los blowholes se presentan en menor tamaño, poseen una poca o nula influencia en la posterior laminación, ya que con el tratamiento térmico y contracción, esos poros internos tienden a soldarse, no así los pinholes (I. Mamuzic, 2005).

La clasificación de las macrografías se realiza según la tabla 4:

Tabla 4: Clasificación de pinholes según su longitud.³⁰

Pinhole Superficial	Característica del defecto	Calificación
Bajo	Pinhole menor a 3 mm de longitud	Grado 1
Medio	$3 \text{ mm} \leq \text{Largo Pinhole} \leq 6 \text{ mm}$	Grado 2
Alto	Pinhole mayor o igual a 6 mm	Grado 3

Como consecuencia de que la metalurgia de este grado es pseudo-efervescente, sólo se desoxida parcialmente el acero, por lo que la posible aparición de porosidades es un hecho.

La mayor incidencia en el producto terminado se da con los pinholes de grado 2 y 3, ya que las palanquillas al entrar al horno, para su posterior laminación, se desprenden de una "cáscara" de óxido de 2 a 3 mm, con lo cual los pinholes superficiales de grado 1 desaparecen.

³⁰ Documentos CAP Acero.

Capítulo 4. Resultados y Discusiones

4.1 Balance de Masa Convertidor BOF

Con el fin de cuantificar las mejoras en el proceso de conversión, implementadas al convertidor BOF, se realizó un balance de masa con los parámetros especificados en el capítulo 3 sección 2. Se tomó como base de datos 120 hornadas del grado estudiado separadas por fecha, con 60 hornadas por cada periodo.

- Periodo 1: 8 de Abril de 2016 al 20 de Agosto de 2016.
- Periodo 2: 1 de Septiembre 2016 al 3 de Noviembre 2016.

El límite entre los dos periodos considerados, coincide con la implementación del nuevo sistema de soplado.

Desde este punto, el periodo 1 será considerado como periodo "estándar" y el periodo 2 como periodo "modificado".

Se tomaron 4 parámetros a analizar entre los dos periodos; %FeO en la escoria, masa de escoria, oxígeno soplado y oxígeno disuelto en el acero.

Los datos calculados mediante el balance de masa, fueron contrastados con los valores medidos por ensayos químicos de escorias.

4.1.1 Óxido de Hierro en la escoria

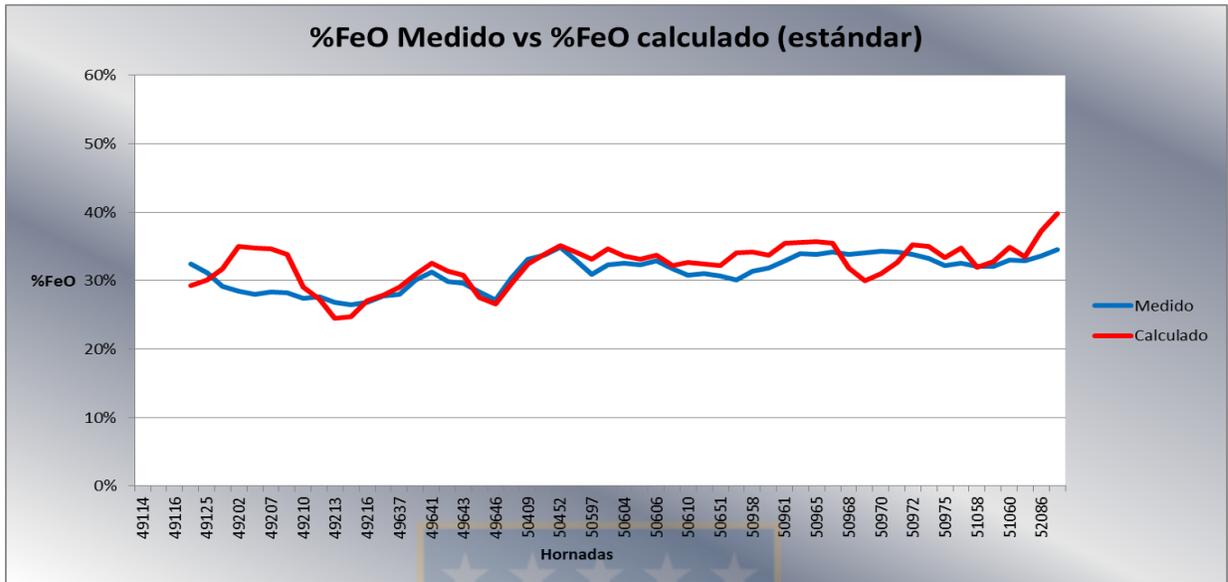


Figura 21: %FeO medido vs %FeO calculado, ajustado a media móvil. Periodo Estándar.

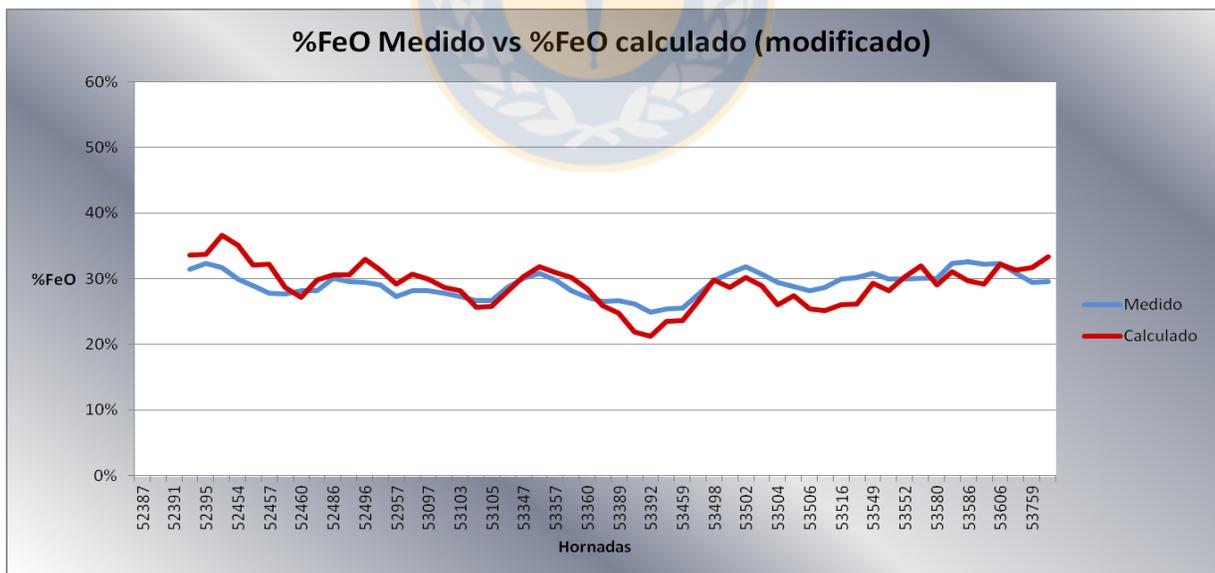


Figura 22: %FeO medido vs %FeO calculado, ajustado a media móvil. Periodo Modificado.

Tabla 5: Porcentaje de óxido de hierro medido en la escoria.³¹

%FeO	Estándar	Modificado
Promedio	31,4%	29,1%
Desviación Estándar	3,04%	2,9%

Analizando las figuras 21 y 22 se ven datos muy similares en ambos periodos, esto dado que el cálculo del %FeO en la escoria fue realizado con datos reales en cuanto a %Fe entrante que se fue en la escoria.

La representación de los datos se realizó mediante la función media móvil de Microsoft Excel, con el fin de suavizar las curvas y ajustar los datos a sus promedios, con periodo 4.

De los resultados que se muestran en la tabla 5, se puede determinar que en el periodo modificado (luego de la implementación de la mejora en el sistema de soplado del convertidor) se generó una escoria menos oxidada, con una disminución en el contenido de óxido de hierro, comparado con el periodo estándar anterior.

En promedio, el %FeO en la escoria disminuyó 7,9%; de 31,4% en el periodo estándar, a 29,1% en el periodo modificado.

En números concretos, en el periodo luego de la implementación del BOF Calculator, el hierro en la escoria disminuyó 215 kilogramos aproximadamente por hornada.

Para demostrar de forma clara la variación entre ambos periodos, se realizaron tablas de frecuencia para contrastar datos calculados y medidos.

³¹ Elaboración propia.

Tabla 6: Tabla de frecuencias correspondiente a datos calculados de %FeO.³²

Rangos (%)	Periodo Estandar		Periodo Modificado	
	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
0-15	0	0%	0	0%
15-20	1	2%	2	3%
20-25	2	3%	13	22%
25-30	12	20%	21	35%
30-35	26	43%	16	27%
35-40	15	25%	7	12%
40-45	4	7%	1	2%
45-50	0	0%	0	0%
Total	60	100%	60	100%

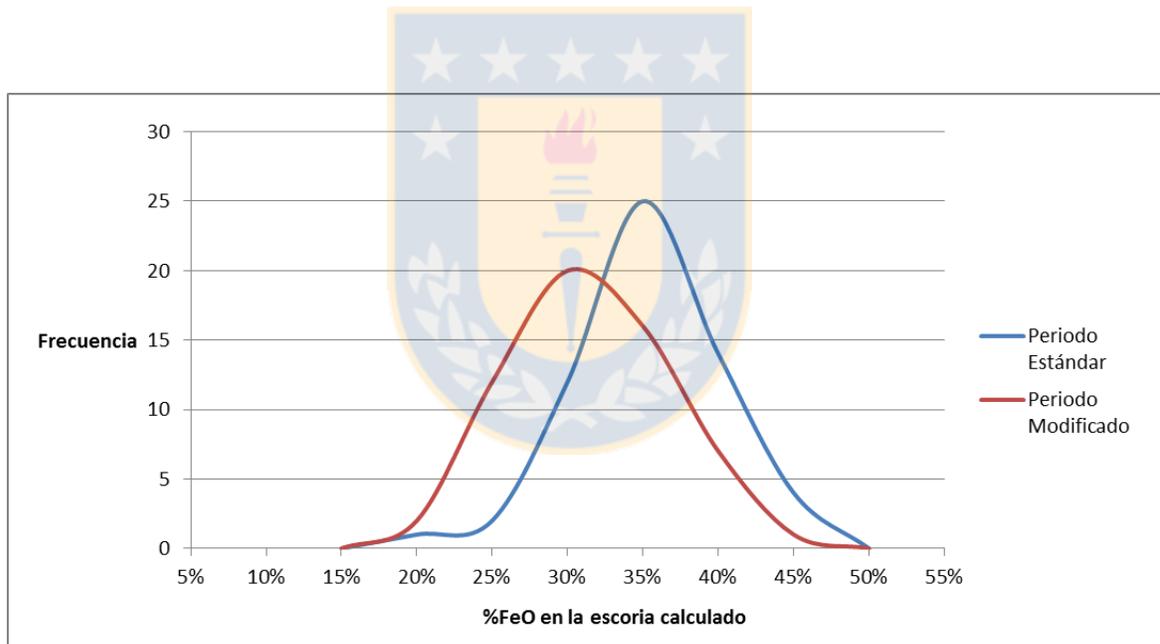
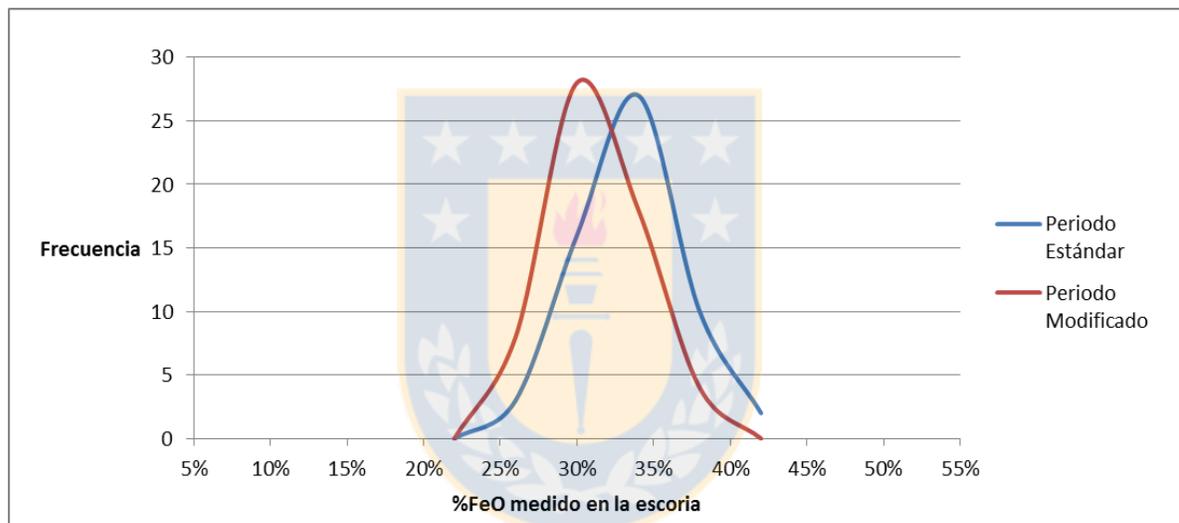
*Figura 23: Gráfico de frecuencias con datos calculados de %FeO*³² Elaboración Propia.

Tabla 7: Tabla de frecuencias correspondiente a datos medidos de %FeO.³³

Rangos (%)	Periodo Estándar		Periodo Modificado	
	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
0-22	0	0%	0	0%
22-26	3	5%	9	15%
26-30	16	27%	28	47%
30-34	28	47%	19	32%
34-38	11	18%	4	7%
38-42	2	3%	0	0%
Total	60	100%	60	100%

*Figura 24: Gráfico de frecuencias con datos medidos de %FeO.*

De la figura 23 y la tabla 6, se ve claramente que en el periodo estándar los datos correspondientes al %FeO calculado están concentrados entre 30-35%, mientras que los del periodo modificado se agrupan alrededor de 25-30%.

De la tabla 7 se nota la misma tendencia que la ya señalada, solo que los resultados están más acotados. En el periodo estándar, el 47% de los datos están agrupados entre 30-34%, en cambio en el periodo modificado, el 47% están en el rango entre 26-30%.

³³ Elaboración propia.

4.1.2 Oxígeno insuflado al convertidor

Mediante el balance de masa realizado, se calculó la cantidad de oxígeno estequiométrico necesaria para que las reacciones de oxidación en el baño ocurrieran en un 100%. Tomando este dato calculado como base, se comparó con el O₂ que realmente fue soplado durante cada proceso, registrado en el sistema MES.

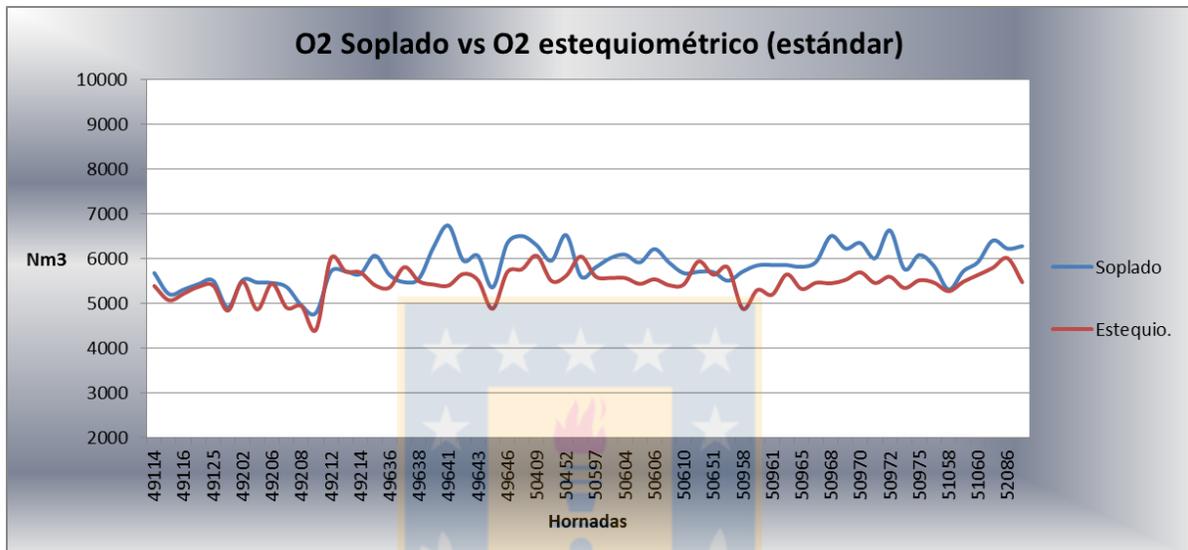


Figura 25: O2 estequiométrico teórico vs O2 soplado, periodo estándar.

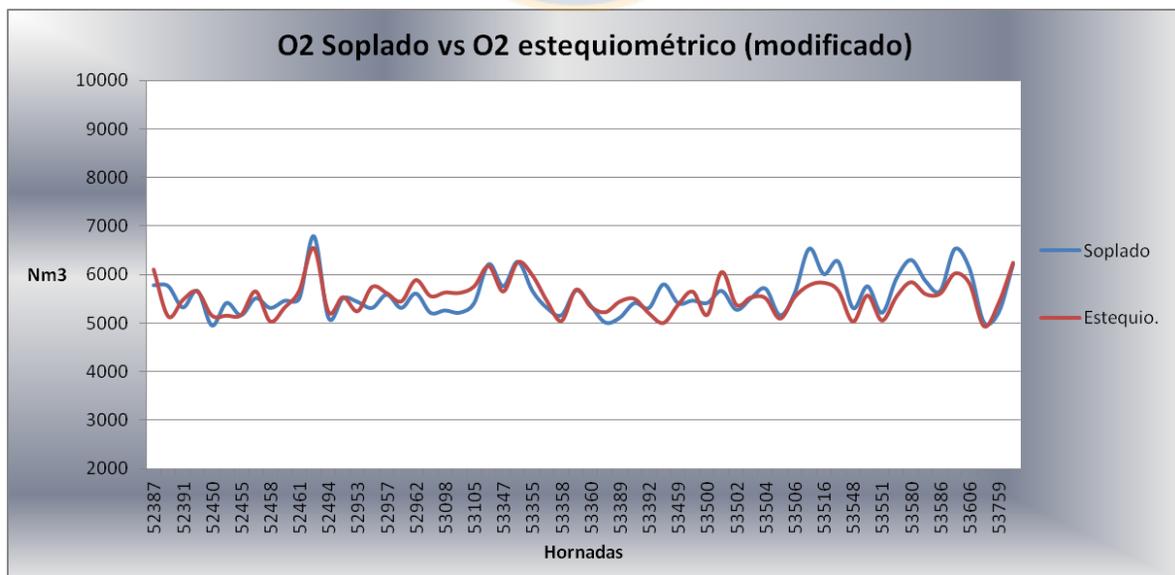


Figura 26: O2 estequiométrico teórico vs O2 soplado, periodo modificado.

Tabla 8: Eficiencia del O₂ soplado comparado con el O₂ estequiométrico.

Eficiencia	Estándar	Modificado
Promedio	93,9%	99,5%
Desviación Estándar	5,6%	4,8%

Observando las figuras 25 y 26, es posible apreciar claramente el ajuste de la cantidad de Nm³ soplados de O₂, es decir, que la curva azul correspondiente al O₂ soplado se ajusta más a la curva roja correspondiente al O₂ estequiométrico en el caso del periodo modificado.

De estos resultados se concluye que la cantidad soplada en el periodo modificado, se mejoró en comparación con el periodo estándar. Esto quiere decir, que aumentó su eficiencia y hubo menos pérdida de oxígeno no reaccionante en los gases de salida.

En promedio el O₂ aumento 5,9% su eficiencia; con 93,9% en el periodo estándar y 99,5% en el periodo modificado.

4.1.3 Oxígeno disuelto en el acero

Para este análisis se consideraron los datos recopilados por el sistema MES. Antes de finalizar el proceso de conversión, se detiene el soplado y se introduce una sublanza, la cual mide de forma preliminar la temperatura, % de Carbono y cantidad de O₂ disuelto en el baño.

La unidad de medida usada para cuantificar los datos obtenidos es ppm.

Tabla 9: Concentración de O₂ disuelto en el acero, antes de finalizar el proceso de soplado.

Concentración (ppm)	Estándar	Modificado
Promedio	491	430
Desv. Estándar	129	131

Debido a la alta desviación estándar presente en las 2 muestras, se recurre a una forma más representativa para los datos, en este caso, mediante tablas de frecuencias.

Tabla 10: Tabla de frecuencias de concentración de O₂ disuelto en el acero.³⁴

Rango (ppm)	Estándar		Modificado	
	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
0-100	0	0%	1	2%
101-200	1	2%	1	2%
201-300	2	3%	2	3%
301-400	16	27%	27	45%
401-500	17	28%	16	27%
501-600	14	23%	6	10%
601-700	7	12%	4	7%
701-800	2	3%	2	3%
801-900	1	2%	1	2%
Total	60	100%	60	100%

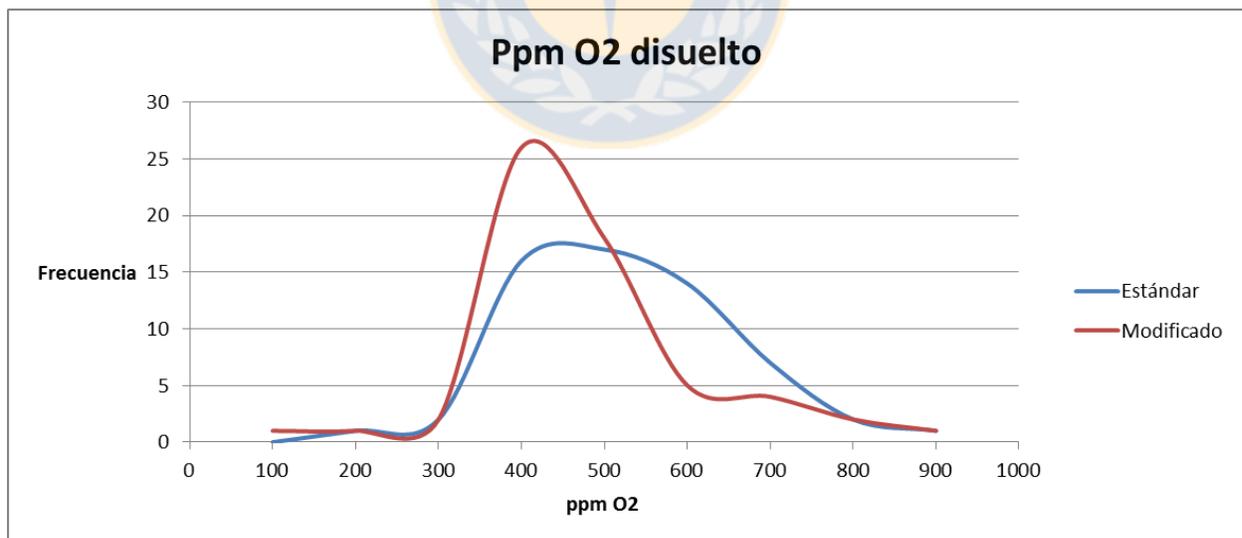


Figura 27: ppm de O₂ en el periodo estándar vs ppm de O₂ en periodo modificado.

³⁴ Elaboración propia.

Con la tabla 10 de frecuencias podemos tener una visión general de cómo se agrupan los datos. Mientras que en el periodo estándar, el 78% de los valores se da entre 300 y 600 ppm; en el periodo modificado vemos que el 45% de los datos se concentran alrededor de las 400 ppm.

4.1.4 Masa de escoria generada.

Para la determinación de la masa de escoria recopilada del MES, dado que el valor entregado no es 100% escoria, se debe considerar un remanente de acero que no alcanza a ser sangrado y es vaciado en la escoriera junto con la escoria. Se consideró 5% de la masa de la escoria como fase metálica para ambos periodos.³⁵

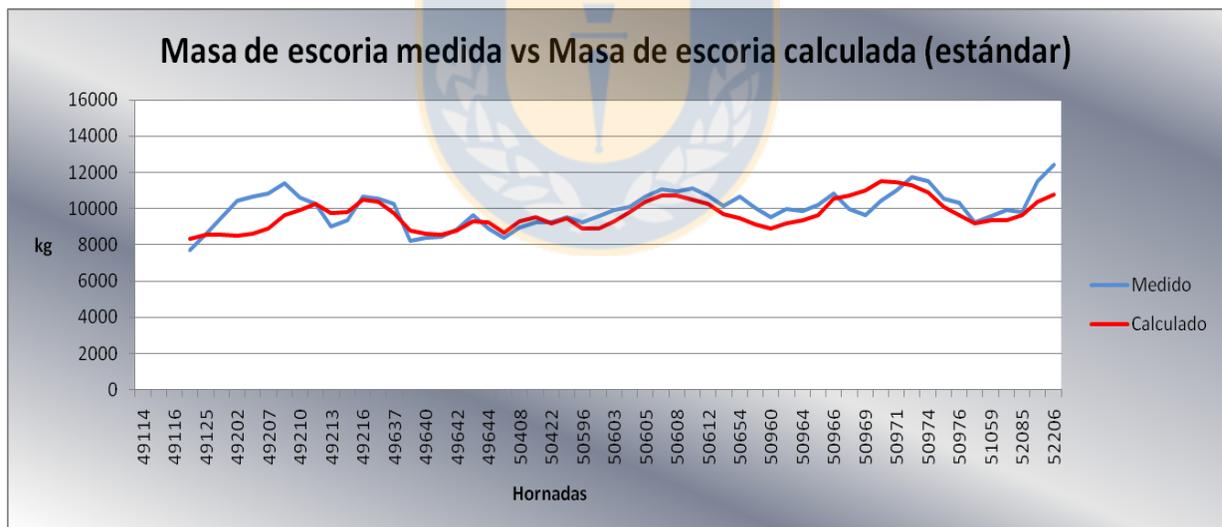


Figura 28: Masa de escoria medida vs Masa de escoria calculada, ajustado a media móvil. Periodo Estándar

³⁵ Información entregada por personal de planta.

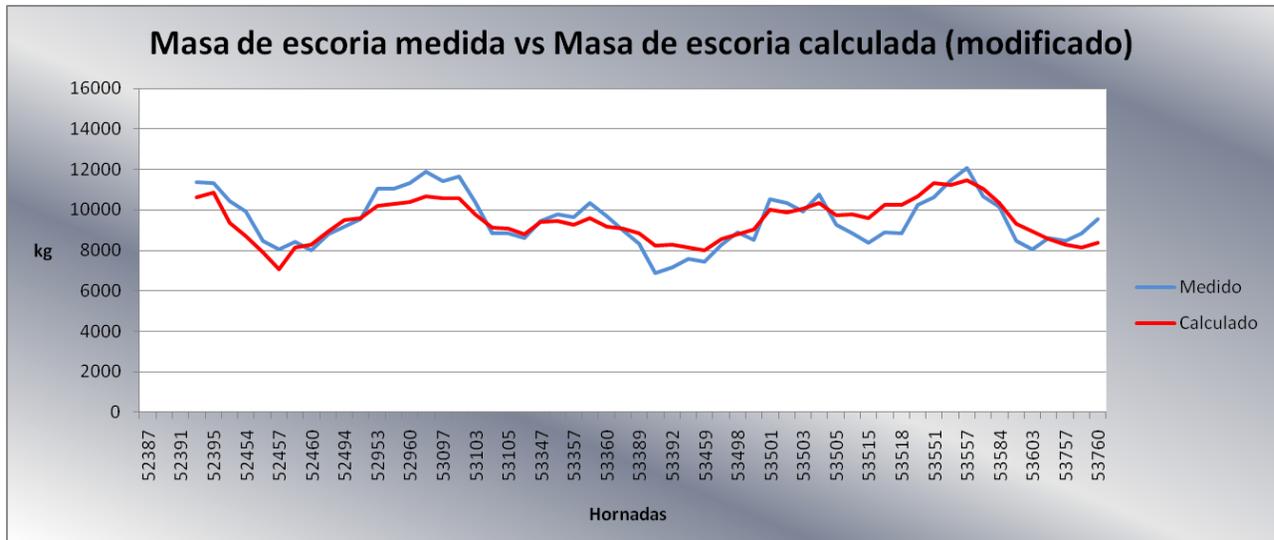


Figura 29: Masa de escoria medida vs Masa de escoria calculada, ajustado a media móvil. Periodo Modificado

Comparando la figura 28 y 29, no es tan fácil diferenciar a simple vista cual periodo presenta una generación de escoria mejor ajustada al valor calculado, pero basándose en la teoría, debido a la disminución de la presencia de FeO en la escoria y éste al ser uno de los grandes contribuyentes en la masa de la escoria, se observa que la masa es menor y está más cercana al valor teórico en el periodo modificado.

Tabla 11: Masas de escoria en periodo estándar y modificado.

Masa de escoria (kg)	Estándar		Modificado	
	Medido	Calculado	Medido	Calculado
Promedio	10390	9697	9581	9481
Desviación Estándar	2064	1330	2159	1400
Diferencia Porcentual	7,15%		1,05%	

En promedio, la masa de la escoria se aproxima más a la teórica en el periodo modificado, teniendo una diferencia de 1,05% entre las dos, en cambio en el periodo estándar se presenta una diferencia de 7,15%.

4.2 Comportamiento del Oxígeno en la Metalurgia Secundaria

Considerando los datos recopilados durante el tratamiento en la estación de ajuste, se pueden obtener las concentraciones de oxígeno disuelto en el acero. Debido a que en la gran mayoría de las muestras se observó una disminución en el contenido de oxígeno, para el análisis se consideraron sólo las muestras de entrada y salida de la estación de ajuste. A partir de los datos de la tabla 12, se observa que la tendencia en la baja de las ppm de oxígeno se mantiene, aunque no tan pronunciada, con respecto a lo visto en el balance de masa del convertidor, comparando los dos periodos analizados.

Tabla 12: Concentraciones de oxígeno en la estación de ajuste.

Concentración (ppm)	S1 (Llegada a la EAM)	S2 (Salida a la MCC)
Estándar	43.66	41.63
Modificado	20.28	18.88

Con el fin de realizar una simulación en el procedimiento realizado en la metalurgia secundaria, para estimar uso de ferroaleaciones y comportamiento del oxígeno durante su tratamiento, se seleccionaron hornadas específicas del periodo normal y del periodo modificado. Para que la selección fuera lo más representativa posible, se eligieron hornadas que presentaran una composición química dentro del rango admisible del grado.

Teniendo la composición química del acero al momento de ser sangrado y al término de la metalurgia secundaria, y también la composición de la escoria, preliminarmente, se tenían los datos necesarios para realizar el balance

Mediante las fórmulas antes descritas en la sección 3.4, se intentó determinar las diferencias en el tratamiento en los dos periodos analizados.

Tabla 13: Adiciones al grado 1006 en la estación de ajuste.

Adiciones	Periodo Estándar	Periodo Modificado
FerroSilicio	158,5 kg	136,3 kg
FeMn mC	280,2 kg	287,5 kg
Aluminio	40 kg	40 kg

Los valores reflejados en la tabla 13, hacen referencia a la cantidad de ferroaleaciones calculadas en promedio para cada periodo, considerando 10 muestras por periodo. Se nota una leve baja en la cantidad de ferrosilicio, atribuible a la menor concentración de oxígeno presente en el acero en el periodo modificado, pero un leve aumento en la cantidad de ferromanganeso utilizado.

Debido a la cantidad de factores que no es posible manejar en esta etapa, se dificulta realizar un análisis conciso de las variaciones en el acero, siendo los resultados expuestos en cuanto a uso de ferroaleaciones, no representativos, por lo que el análisis se enfocó mayormente en las variaciones de la escoria.

El factor más importante a analizar, y que arrojó resultados más concluyentes en la etapa del convertidor BOF es la variación en el óxido de hierro en la escoria.

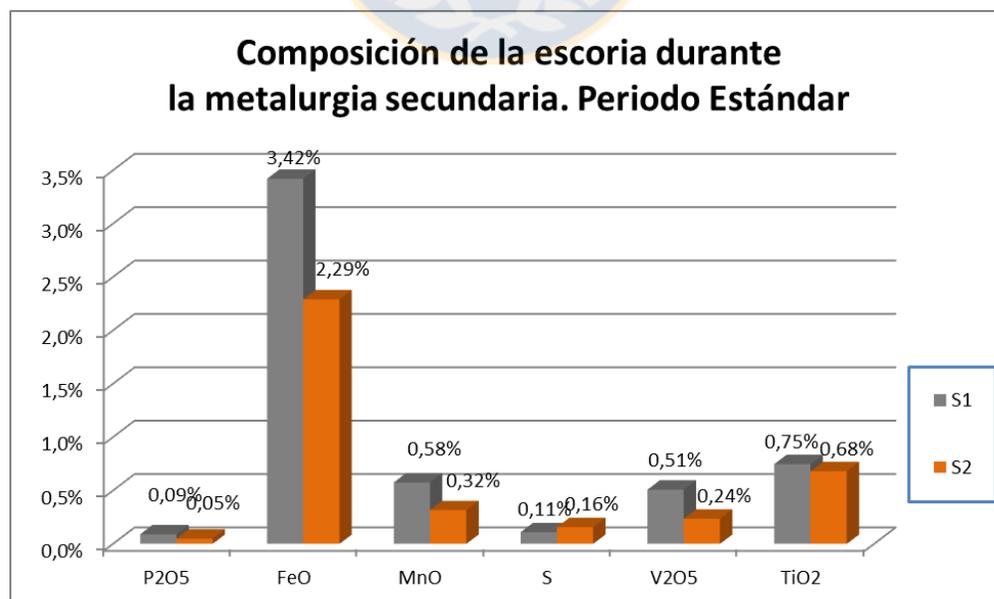


Figura 30: Composición de la escoria a la llegada (S1) y salida (S2) de la estación de ajuste. Periodo Estándar.

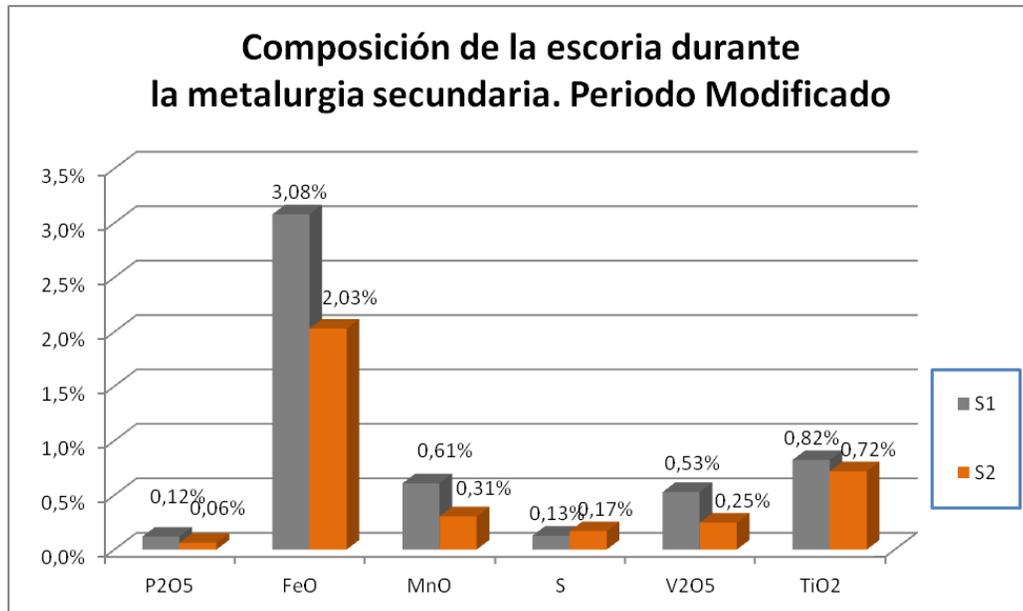


Figura 31: Composición de la escoria a la llegada (S1) y salida (S2) de la estación de ajuste. Periodo Modificado

Las figuras 30 y 31 fueron realizadas considerando sólo los elementos con un porcentaje menor al 5% de la composición de la escoria. Componentes como el CaO, SiO₂, MgO y Al₂O₃ representan alrededor de un 85% de la composición total.

Comparando los dos periodos, vemos que el %FeO es menor en S1 y S2 (Entrada y Salida) en el periodo modificado.

Además del FeO, es posible apreciar la baja, en ambos periodos, de la concentración de titanio, vanadio, manganeso y fósforo. Dado que durante su tratamiento en la estación de ajuste se agregan adiciones, ya sea Cal, Ferrosilicio o Ferromanganeso, la masa de la escoria aumenta y por consiguiente las concentraciones de estos elementos tienden a disminuir. En el caso del FeO, V₂O₅ y MnO, esta baja se le atribuye a una reversión del elemento al acero, provocando una reducción del compuesto, y entablando una nueva reacción de oxidación con elementos más ávidos por el oxígeno como el silicio.

Otro punto importante a tener en consideración es el paso de escoria del proceso de conversión hacia la cuchara. Aunque se trate de evitar, durante el

sangrado del acero siempre pasa una parte de escoria, de aproximadamente 900 kg, pudiendo llegar a 1100 kg.

La figura 32 representa los componentes principales de la escoria obtenida del proceso de conversión BOF, en la cual se destaca el alto contenido de FeO presente.

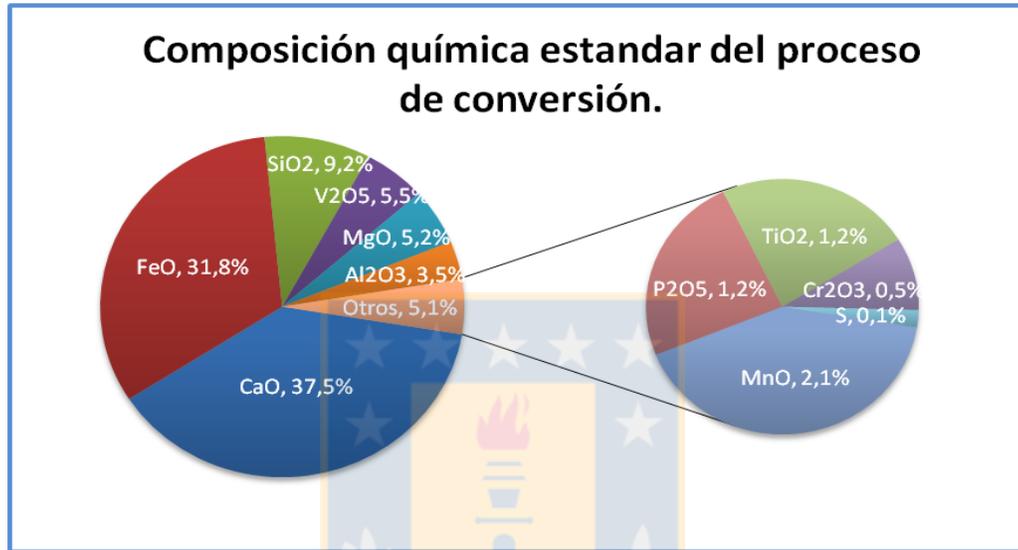


Figura 32: Composición típica de escoria del convertidor BOF.³⁶

La variación en la cantidad de FeO en la escoria del convertidor, afecta positivamente en la etapa de la Metalurgia Secundaria, dado que una parte de esa escoria pasa a la siguiente etapa. El %FeO en la escoria, es el factor determinante para la cantidad de oxígeno disuelto que tendremos en el acero. Aunque se aumente la cantidad de desoxidante en el baño, el sistema Fe-O-FeO va a tender siempre al equilibrio y la concentración de oxígeno volverá a aumentar mientras el nivel de FeO del sistema se mantenga elevado.

³⁶ Elaboración propia.

4.2.1 Influencia y Análisis del Nitrógeno en la metalurgia secundaria

Con el objetivo de obtener una trazabilidad en la variación del nitrógeno en el acero, se buscó la relación entre la concentración de este elemento (medido a su llegada a la Estación de Ajuste) y la cantidad de nitrógeno inyectado como gas agitador por los tapones porosos en el convertidor BOF.

El nitrógeno necesario para la agitación en el convertidor se calcula según el sistema controlador nivel 2, encargado del pre cálculo automático de los flujos de N y Ar como gases agitadores en el proceso.

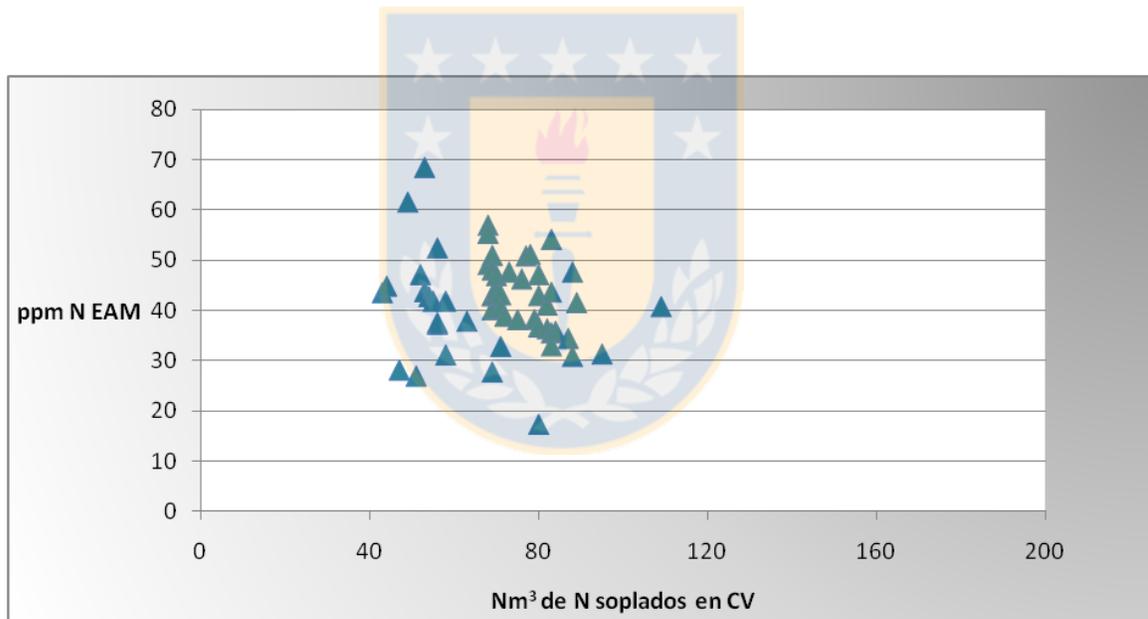


Figura 33: Concentración de nitrógeno al comienzo de la EAM vs nitrógeno como gas agitador en el convertidor BOF. Periodo Estándar.

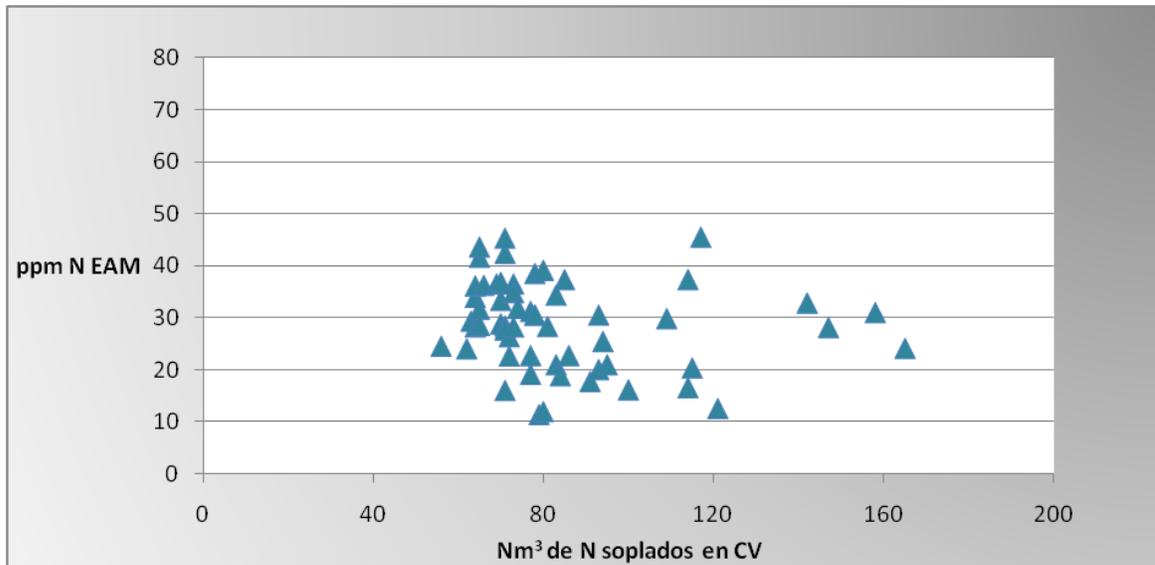


Figura 34: Concentración de nitrógeno al comienzo de la EAM vs nitrógeno como gas agitador en el convertidor BOF. Periodo Modificado.

Como es posible apreciar en las figuras 33 y 34, no existe una relación entre los Nm³ inyectados y los ppm N medidos, se mantienen prácticamente independientes.

Dado que se poseen datos desde la llegada a la estación de ajuste, estos se comparan con las muestras tomadas durante el tratamiento, con E-1 la muestra de entrada, E-2 la muestra intermedia y E-D la muestra de despacho, demostrando un constante aumento en su concentración como se ve en la figura 35, aunque siempre dentro del rango admisible para este grado de acero (<80 ppm).

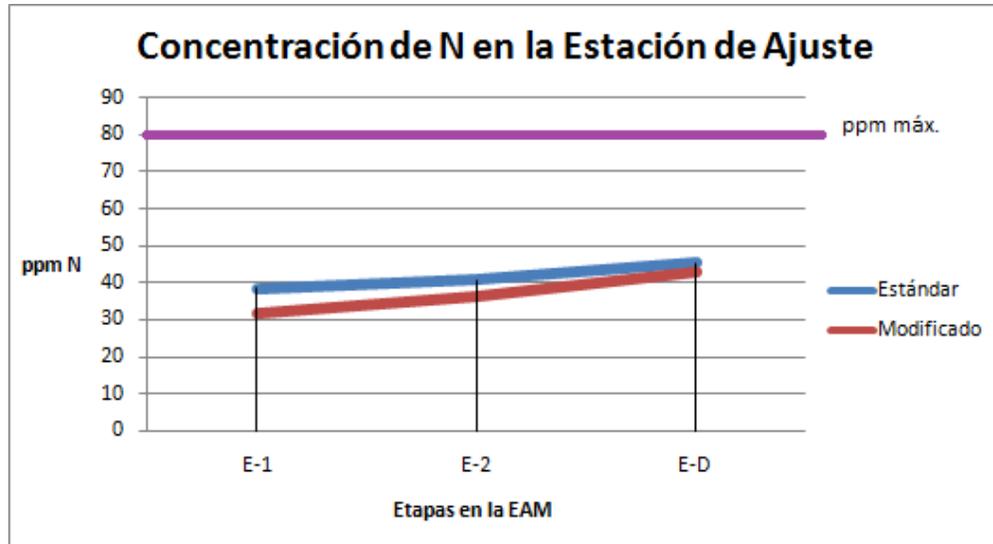


Figura 35: Variación de nitrógeno según las etapas de la metalurgia secundaria.

Los rangos promedio para los dos periodos rondan entre las 30 y 45 ppm de nitrógeno, lo cual, salvo casos puntuales donde se registre un contenido elevado, se encuentran muy por debajo de la concentración crítica de 80 ppm.

El constante aumento es posible atribuirlo a las ferroaleaciones, o el intermitente contacto del acero con el ambiente, visto en la sección 2.3.

4.2.2 Hidrógeno en el acero

Para realizar los análisis correspondientes se necesitó una medida estimada de su concentración en el acero fundido.

Debido a que el grado de acero analizado es de calidad comercial, no requiere de un control tan exhaustivo de hidrógeno, aunque sería lo ideal. El valor asociado que conlleva realizar mediciones de hidrógeno a cada hornada, aumenta el costo de producción.

Para realizar la medición de la concentración de hidrógeno en el acero fundido, el equipo utilizado es el Hydris Multi-Lab, el cual mide el hidrógeno contenido en un gas de acarreo de nitrógeno.

Durante el mes de diciembre, se muestrearon 13 hornadas en la artesa de la máquina de colada continua, del grado estudiado, con el propósito de obtener un valor medio de concentración de hidrógeno en el acero con los siguientes resultados que se observan en la tabla 14 a continuación:

Tabla 14: Mediciones de hidrógeno en la artesa.

Número de Secuencia	[H] ppm
1	5,00
2	5,20
3	5,00
4	5,30
5	5,00
6	4,20
7	4,50
8	4,00
9	4,80
10	4,20
11	4,70
12	4,10
13	4,00

Dada la baja desviación estándar entre los datos muestreados (0,47), el valor promedio se tomará como 4,62 ppm para posteriores análisis.

Como se vio en la sección 2.3, la presencia del hidrógeno es atribuida al contacto del acero con el ambiente, debido a la humedad relativa.

La aparición de pinholes mayores a 3 mm durante el 2016 se dio principalmente en el mes de agosto como es posible apreciar en la figura 36, lo que da para suponer

una relación con la humedad ambiental de ese mes, dado que corresponde a pleno invierno.

Tabla 15: Palanquillas muestreadas con defectos tipo porosidades mayores a 3 mm.

	Palanquillas muestreadas	Defectos	%ph>3mm
Julio	18	2	11%
Agosto	40	28	70%
Septiembre	65	2	3%
Octubre	83	2	2%
Noviembre	57	0	0%
Diciembre	72	1	1%

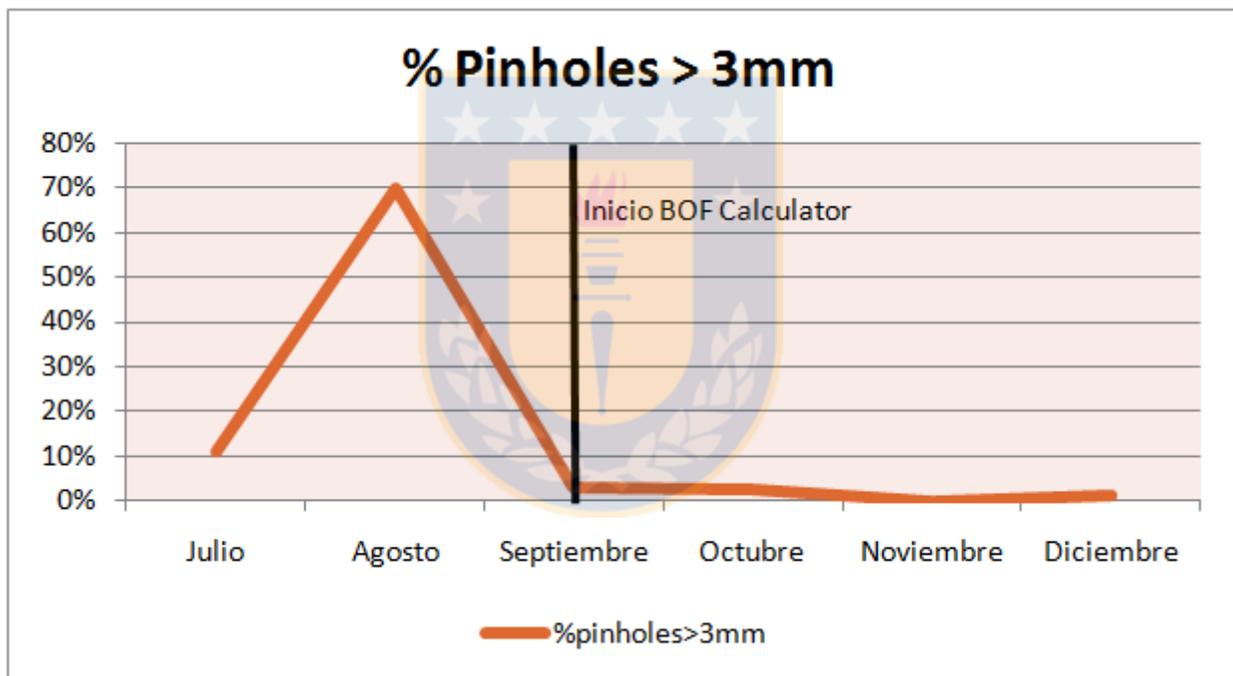


Figura 36: Porcentaje de pinholes mayores a 3 mm. durante el segundo semestre 2016.

La aparición de los primeros defectos data de julio del 2016, momento en el cual se muestrearon todas las hornadas producidas del grado 1006.

Debido a que no se tienen registros de mediciones realizadas con Hydris durante los meses de aparición de los defectos, no es posible establecer a ciencia cierta una

relación entre la humedad relativa propia de esos meses y el aumento súbito de las porosidades en la palanquilla.

4.3 Uso de Agitadores Electromagnéticos de Molde (M-EMS) en la Colada Continua

En la figura 37 se muestran macrografías de palanquillas, las cuales fueron producidas sin el uso de los agitadores electromagnéticos durante su colada. Ésta fue realizada a 2 palanquillas y arrojó los siguientes resultados:

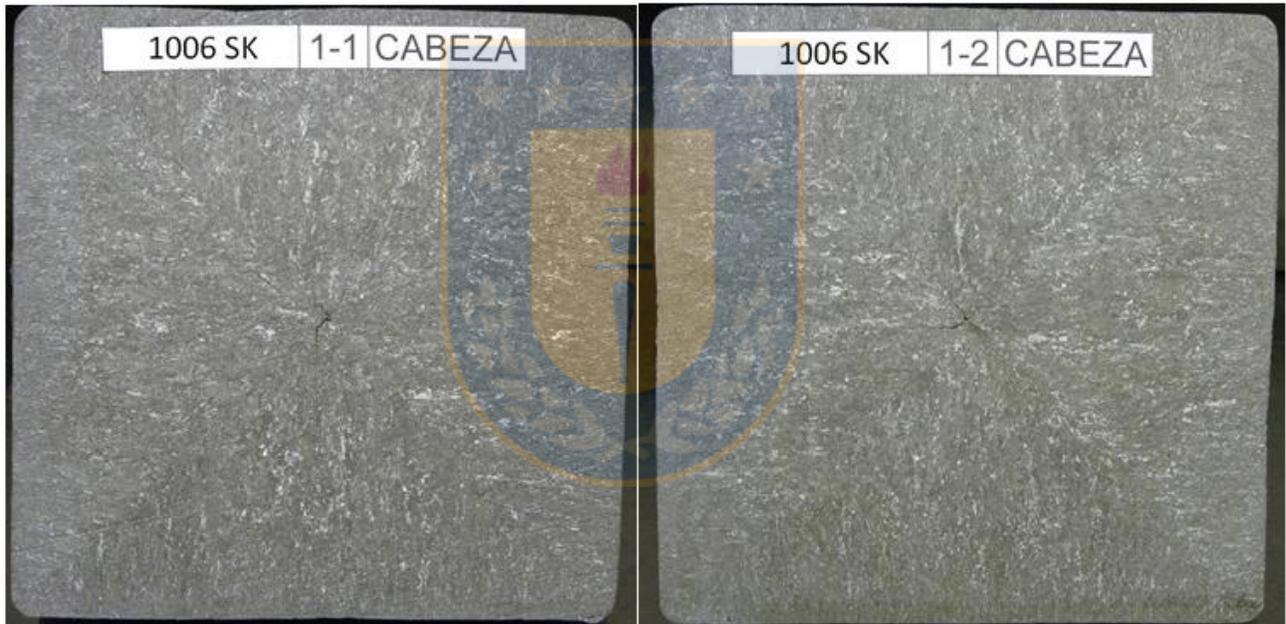


Figura 37: Macrografías de corte transversal de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cabeza

A las 2 palanquillas muestreadas se les tomo una muestra la cual se dividió en 3 partes, cabeza, medio y cola. Realizando una inspección visual, no se aprecian defectos mayores tipo porosidades en la sección transversal de las macrografías muestreadas.

Dado que el objetivo fue validar el uso de los agitadores electromagnéticos en la desorción de gases en este grado en específico, no es posible llegar a esa conclusión por el momento, ya que los resultados obtenidos anteriormente con agitadores y las pruebas realizadas sin agitadores, no presentaron ningún defecto visible en las macrografías.

Basándose en los resultados obtenidos, surge la interrogante de si realmente es necesario el uso de los agitadores electromagnéticos de molde para colar este grado.

Debido a la baja cantidad de palanquillas muestreadas, se realizó una segunda prueba considerando 2 líneas de la colada continua, con 2 palanquillas por cada línea, con el fin de validar o refutar los resultados obtenidos anteriormente.



Figura 38: Macrografías de palanquillas correspondientes a las líneas 2 y 4 respectivamente. Prueba 2

En la figura 38, se observan las macrografías correspondientes a las 2 líneas de la colada continua muestreadas. En esta segunda prueba realizada, se abarcaron el doble de muestras que en la experiencia anterior, y salvo una muestra que presentó un pinhole de grado 1, en las demás no se aprecia ningún defecto tipo porosidad.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

El estudio realizado en CAP Acero ha permitido obtener una serie de conclusiones, las cuales se presentan a continuación:

- En la primera parte de este estudio, se realizó un balance de materia en el convertidor BOF, para analizar los cambios que provocó el nuevo software controlador BOF Calculator en el procesamiento del acero. El aumento en las variables a controlar y la personalización del software con respecto a la planta ayudaron a mejorar el proceso, se ajustaron los m^3 soplados, se disminuyó el porcentaje de óxido de hierro en la escoria y por ende, la concentración de oxígeno disuelto fue menor con respecto al periodo estándar.
- Al tener una escoria con menor concentración de óxido de hierro, la cantidad de oxígeno para alcanzar el equilibrio de fases entre Fe-O-FeO también disminuye, y considerando que una parte de esta escoria pasa a la etapa de metalurgia secundaria, resulta muy importante esta disminución, ya que la concentración de oxígeno necesaria para alcanzar el equilibrio de fases será menor durante todo su tratamiento.
- Dado que para la formación de porosidades, basándose en estudios antes mencionados, el mayor contribuyente a la presión de gases es el hidrógeno, se recomienda no descuidar las posibles fuentes de humedad ambiental a las que esté expuesto el acero, como puede ser evitando el contacto excesivo de las ferroaleaciones con la intemperie.
- Con base en las pruebas realizadas sin agitador electromagnético de molde, y gracias a las modificaciones antes mencionadas, no se aprecia una influencia destacable en cuanto a porosidades entre las palanquillas coladas con o sin agitador.

- Se recomienda comenzar a colar paulatinamente sin agitadores electromagnéticos de molde en el grado 1006, ya que comparando las palanquillas coladas con agitador, con las sin agitador, no se perciben diferencias notables. Esto a su vez implica un beneficio económico en la producción del grado, en cuanto a eficiencia energética.
- Se recomienda continuar con el plan de acción instaurado por la aparición de porosidades, ya que como se vio en la sección 2.3, un leve aumento en la concentración de hidrógeno podría influir en una reaparición del defecto señalado.



6. Bibliografía.

2nd International Conference on Clean Steel. 1981. Balantonfüred, Hungary : s.n., 1981.

Campos, G. 2015. *Elaboración de balances de materia y calor en convertidores BOF de CAP Acero Huachipato para la implementación y cálculo de carga en PI-System.* Concepción : Universidad de Concepción, 2015. Memoria de Título Ingeniería Civil Metalúrgica.

Campos, J. A. 2009. *Caracterización de vanadio en escorias de Compañía Siderúrgica Huachipato.* Concepción : Universidad de Concepción, 2009. Memoria de Título Ingeniería Civil Metalúrgica.

CAP Acero. 2016. *Informe de medición isocinética en chimenea Acería CAP.* 2016.

— **2016.** *Manual Procedimientos de Operación convertidores.* Talcahuano : s.n., 2016.

— **2016.** *Manual Procedimientos de Operación EAM.* Talcahuano : s.n., 2016.

Ch.-Y. Chen, K.-Y. Lin. 2011. *Forming factors of blowholes defect in continuously cast beam blank at Dragon Steel.* s.l. : China Steel, 2011. págs. 16-23, Technical Report. 24.

Ghosh, Ahindra. 2000. *Secondary Steelmaking: Principles and Applications.* s.l. : CRC Press, 2000. ISBN 1420042319.

H. Alan Fine, Gordon Geiger. 1993. *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Metallurgical Processes.* s.l. : John Wiley and Sons Incorporated., 1993.

I. Mamuzic, M. Longauerova, A. Trkalj. 2005. *The analysis of defects on continuous cast billets.* s.l. : Metalurgija 44, 2005. págs. 201-207.

J. Enríquez, E. Tremps. 2007. *Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte II. Metalurgia Secundaria.* Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

Lucero, P. 2004. *Efecto de la adición de dolomita en la reversión de vanadio durante el proceso de acería.* Concepción : Universidad de Concepción, 2004. Memoria de Título Ingeniería Civil Metalúrgica.

Pihura, D. 1999. *Blowhole in continuous cast blooms.* Kovine, Zlitrine : Tehnologije 33, 1999. págs. 531-533.

Primetal Technologies. 2015. Primetals Technologies to modernize LD (BOF) converter for HKM in Germany. [En línea] 3 de Nov de 2015.
<http://primetals.com/en/PressAndMedia/Pages/NewsDetails.aspx?NewsID=40#>.

R.J. Fruehan, S. Misra. 2005. *Hydrogen and Nitrogen Control in Ladle and Casting Operations*. Pittsburgh, PA : Carnegie Mellon University, Materials Science and Engineering Department, 2005.

Sánchez, M. 1989. *Balance de Masa y Energía en Procesos Metalúrgicos*. Concepción : Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 1989.

Sarna, Satyendra Kumar. 2013. Electromagnetic Stirring in Continuous Casting Process. *www.ispatguru.com*. [En línea] 29 de Nov de 2013.
<http://ispatguru.com/electromagnetic-stirring-in-continuous-casting-process/>.

V. D. Eisenhüttenleute, M. Allibert. 1995. *Slag Atlas*. s.l. : Verlag Stahleisen, 1995.



7. Anexos

Anexo A: Ejemplos de cálculos

- Determinación de masa de SiO₂ presente en la escoria

De la ecuación 54 despejado el Si en la escoria, queda:

$$Si_{escoria} = Si_{arrabio} + Si_{chatarra} + Si_{cal} + Si_{dolo\ cruda} + Si_{dolo\ calc.} + Si_{mineral} - Si_{acero} - Si_{polvo}$$

Ecuación (A.1)

Con $Si_{polvo} = 0,03 \times Si_{entrada} = 0,03 \times Si_{arrabio} + Si_{chatarra} + Si_{cal} + Si_{dolo\ cruda} + Si_{dolo\ calc.} + Si_{mineral}$

$$Si_{escoria} = 0,97 \times (Si_{arrabio} + Si_{chatarra} + Si_{cal} + Si_{dolo\ cruda} + Si_{dolo\ calc.} + Si_{mineral}) - Si_{acero}$$

Para determinar el Si de cada fuente, lo podemos expresar como:

$$Si_x = Masa_x \times \%Si_x$$

Ecuación (A.2)

Con X, pudiendo ser cualquiera de las fuentes de entrada o salida.

Dado que el Si en la escoria se presenta como SiO₂, tenemos:

$$\frac{M_{Si_{escoria}}}{PM_{Si}} = \frac{M_{SiO_2}}{PM_{SiO_2}}$$

Ecuación (A.3)

La cual puede ser expresada como:

$$M_{Si_{escoria}} = \frac{M_{SiO_2}}{PM_{SiO_2}} \times PM_{Si}$$

Ecuación (A.4)

Igualando y despejando la ecuación 39 con la ecuación 36 y reemplazando la ecuación 37, resulta:

$$M_{SiO_2} = \frac{PM_{SiO_2}}{PM_{Si}} \times (0,97 \times (M_a \times \%Si_a + M_{ch} \times \%Si_{ch} + M_{cal} \times \%Si_{cal} + M_{dolo} \times \%Si_{dolo} + M_{d.calc} \times \%Si_{d.calc} + M_{min} \times \%Si_{min}) - M_{ac} \times \%Si_{ac})$$

Ecuación (A.5)

- Cálculo de la masa de acero sangrada.

Considerando el Balance de Fe como base:

$$Fe_{arrabio} + Fe_{chatarra} + Fe_{cal} + Fe_{dolo\ cruda} + Fe_{mineral} = Fe_{Acero} + Fe_{escoria} + Fe_{dust}$$

Ecuación (A.6)

Conocemos los flujos de entrada con sus respectivos porcentajes de Fe y como parámetro tenemos que un 1,65% se va a la escoria y un 0,69% por el colector de polvos, por lo tanto, un 97,66% se va al acero.

$$Fe_{Total} = Fe_{arrabio} + Fe_{chatarra} + Fe_{cal} + Fe_{dolo\ cruda} + Fe_{mineral}$$

Ecuación (A.7)

$$Fe_{acero} = Fe_{Total} \times \frac{97,66}{100}$$

Ecuación (A.8)

Teniendo la composición química del acero, obtenemos el $\%Fe_{acero}$, con lo que finalmente:

$$Masa_{acero} = \frac{Fe_{acero}}{\%Fe_{acero}} \times 100$$

Ecuación (A.9)

- Cálculo de las ferroaleaciones como aleantes:

Considerando una hornada estándar con las siguientes características:

- Masa de Acero: 98,3 ton (98.300 kg)
- %Mn: 0,079

La fórmula para el cálculo del Mn como aleante, considerando que la ferroaleación a usar en este caso es el Ferromanganeso medio carbono,

$$masa_{FeMnMC} = \frac{(Mn_{objetivo} - 0,079) \times 101500 \text{ kg}}{100 \times Ley \times Rendimiento}$$

Ecuación (A.10)

El Mn objetivo para el grado 1006 SK debe estar entre 0,35% y 0,30%. Con lo ya descrito en la sección 3.3, el Mn objetivo es el valor máximo ajustado por un factor de corrección, en este caso 0,88.

Los datos de ley y rendimiento se encuentran tabulados en la sección III.3, por lo que el desarrollo queda de esta manera:

$$masa_{FeMnMC} = \frac{(0,35 \times 0,88 - 0,079) \times 98300 \text{ kg}}{100 \times 0,810 \times 0,97} = 286,5 \text{ kg}$$

Ecuación (A.11)

- Cálculo del FerroSilicio como desoxidante

Tomando el ejemplo anterior, tenemos:

- Masa de acero: 98.300 kg.
- O disuelto final del soplado: 403 ppm
- Peso Molecular Si: 28,08 (g/mol)
- Peso Molecular O: 16 (g/mol)
- Peso Molecular SiO_2 : 60,06 (g/mol)

Tomando la ecuación (34) para la formación de SiO_2 , tenemos la siguiente relación:

$$n_{Si} = n_O$$

Ecuación (A.12)

$$\frac{m_{Si}}{PM_{Si}} = \frac{m_O}{2PM_O}$$

Ecuación (A.13)

$$m_{Si} = \frac{PM_{Si}}{2PM_O} \times m_O$$

Ecuación (A.14)

Con

$$m_O = \frac{ppm_O}{1000000} \times m_{acero}$$

Ecuación (A.15)

Finalmente tenemos:

$$m_{FeSi\ 75} = \frac{\frac{PM_{Si}}{2PM_O} \times m_{acero} \times \frac{Ppm\ O\ disuelto}{1000000}}{Ley \times Rendimiento} = \frac{28,08\ (g/mol)}{2 \times 16\ (g/mol)} \times 98.300\ kg \times \frac{403}{1000000} = 46,35\ kg$$

Ecuación (A.16)

Anexo B: Balance de masa general y por composición de flujo

$$M_{arrabio} + M_{chatarra} + M_{adiciones} + M_{oxigeno} + M_{gases\ agitacion} = M_{acero} + M_{escoria} + M_{gases} + M_{polvos}$$

$$M_{chatarra} = M_A + M_B + M_{Interna} + M_{externa} + M_{Plate\ iron} + M_{retorno\ cuchara} + M_{skimmer} + M_{Siberia} + M_{Resife} + M_{Fardo}$$

$$M_{adiciones} = M_{cal} + M_{dolomita\ cruda} + M_{dolomita\ calcinada} + M_{mineral}$$

$$M_{gases\ agitación} = M_{Ar} + M_{N_2}$$

$$M_{gases} = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{SO_2} + M_{Ar} + M_{N_2} + M_{O_2}$$

$$M_{escoria} = M_{SiO_2} + M_{CaO} + M_{MgO} + M_{Fe_2O_3} + M_{P_2O_5} + M_{Al_2O_3} + M_{V_2O_5} + M_{TiO_2} + M_{MnO}$$

$$M_{polvo} = M_{Fe\ como\ Fe_2O_3} + M_{Si\ como\ SiO_2} + M_{P\ como\ P_2O_5}$$

Anexo C: Caracterización del arrabio

El arrabio se obtiene del proceso de reducción del mineral de hierro en el alto horno. Se cargan en su parte superior, denominada tragante, las capas de mineral de hierro, caliza y coque metalúrgico, luego se le inyecta aire precalentado a 1000°C facilitando la combustión del coque, lo que genera elevadas temperaturas y gases

reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, ocurriendo la transformación a arrabio (hierro líquido) y escoria.

El arrabio es una solución de hierro con un contenido de carbono de aproximadamente 4,2 a 4,7% e impurezas tales como (Tabla 16):

- Azufre (proveniente principalmente de la ceniza del coque, de la ganga del mineral de hierro y de los fundentes)
- Silicio (proviene de la ganga y de la ceniza del coque)
- Fósforo (del mineral de hierro)
- Vanadio (del mineral de hierro)
- Manganeso (proveniente del mineral de manganeso cargado)

Tabla 16: Composición química estándar del arrabio.

Elementos	Rangos de porcentaje en peso (%)
Fe	94
C	4.4 – 4.7
Si	0.50 – 0.95
P	0.15
S	0.03
Mn	0.36
Al	0.01
Ti	0.11
V	0.33

Anexo D: Caracterización de la chatarra

La función de la chatarra en el proceso del convertidor es como carga fría, disminuyendo la temperatura del baño metálico, la cual se eleva cuando los componentes de la mezcla comienzan a reaccionar.

En la planta existen 10 tipos distintos de chatarras clasificadas según su origen, los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17: Tipos de Chatarra usadas en CAP Acero.³⁷

Tipo de Chatarra	Descripción
A	Chatarra de hierro o acero. Origen ACC. Restos de cuchara de acero.
B	Chatarra de acero procesada. Origen ACC.
Interna	Chatarra de acero interna de CAP Acero desde MCC y clientes.
Externa	Chatarra de acero externa a CAP, proveedores nacionales o extranjeros.
Plate Iron	Hierro fundido o arrabio sólido, vaciado en cancha especial
Retorno Cuchara	Cuchara de acero que retorna a convertidores.
Skimmer	Escoriado de arrabio en Desulfuración
Siberia	Fondo de olla escoriera
Resife	Restos de boca de carro torpedo.
Fardo	Chatarra externa en disposición tipo fardo.

La caracterización química elemental de la chatarra es realizada por el Departamento de Investigación, Desarrollo y Asistencia al Cliente (IDAC), cuyo detalle se muestra en la tabla 18.

Tabla 18: Composición química de la chatarra.³⁸

Chatarra	%Fe	%C	%Ca	%Mg	%Al	%Si	%P	%V	%Mn	%Ti	%S	%O
A	88,78	0,00	4,29	0,30	0,53	0,70	0,20	0,48	0,50	0,15	0,02	4,05
B	78,76	0,00	8,58	0,60	0,53	1,40	0,61	0,95	1,01	0,30	0,04	7,22
Interna	99,20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Externa	99,15	0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
Plate	93,93	4,15	0,00	0,00	0,00	0,80	0,12	0,60	0,20	0,00	0,20	0,00

³⁷ (Campos, 2015)

³⁸ Documentos IDAC, CAP Acero.

iron												
Retorno Cuchara	99,82	0,10	0,00	0,00	0,004	0,005	0,005	0,002	0,06	0,002	0,005	0,00
Skimmer	83,71	0,04	4,35	0,98	0,07	0,76	0,08	0,55	0,19	0,11	0,30	8,86
Siberia	81,41	0,05	4,91	0,89	0,12	0,89	0,09	0,45	0,25	0,13	0,30	10,51
Resife	90,00	4,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,80
Fardo	99,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo E Caracterización de las adiciones

Este estudio se centró en 4 tipos de adiciones en el convertidor, con las funciones de escorificante o fundente, regular la basicidad de la escoria, proteger el recubrimiento refractario y controlar la temperatura.

La cal (CaO) es un producto que se obtiene calcinando la caliza (CaCO₃) por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva.

La cal y la dolomita cruda (CaMg(CO₃)) cumplen la función de escorificantes, combinándose con los constituyentes ácidos del baño, no deseables en la composición del acero, para formar una escoria inmisible del metal fundido.

Otra función de la cal junto con la dolomita cruda es de disminuir la temperatura del baño durante el soplado en el convertidor. En algunos casos, se usa mineral de hierro (Fe₂O₃, hematita) para esta función, presentando una mejora en el contenido de hierro metálico final, pero se trata de evitar su uso debido a mayores costos asociados.

La dolomita calcinada es usada principalmente para proteger el revestimiento refractario por su gran contenido de MgO (Campos, 2015)

La composición química de cada adición se presenta en la tabla 19:

Tabla 19: Composición química de las adiciones³⁹

Adiciones	%Ca	%Mg	%Si	%Al	%Fe	%S	%P	%C	%O
Cal	65,75	0,95	0,69	0,26	0,23	0,04	0,04	0,48	31,56
Dolomita Cruda	17,87	11,46	0,93	1,06	2,45	0,10	0,10	12,00	54,03
Dolomita Calcinada	35,74	18,09	1,87	0,53	0,00	0,04	0,03	0,00	43,72
Mineral	0,40	0,30	1,90	0,21	66,00	0,00	0,02	0,00	31,02

Anexo F: Parámetros controlables durante la Metalurgia Secundaria

1) Agitación del Acero.

La agitación del acero es posible por la inyección del argón a través de un tapón poroso ubicado en la parte inferior de la cuchara. Éste es usado con la finalidad de homogeneizar la temperatura y composición química del acero, y aumentar la interacción entre el acero y la escoria.

La agitación con argón en la cuchara para las distintas etapas del tratamiento metalúrgico secundario se puede clasificar en los siguientes tipos; Agitación de Limpieza, de Calentamiento, de Adiciones y Máxima.

A continuación se presenta en la figura 39 un diagrama de un perfil de tratamiento simplificado que ilustra la temperatura y el nivel de agitación.

³⁹ Documentos IDA, CAP Acero.

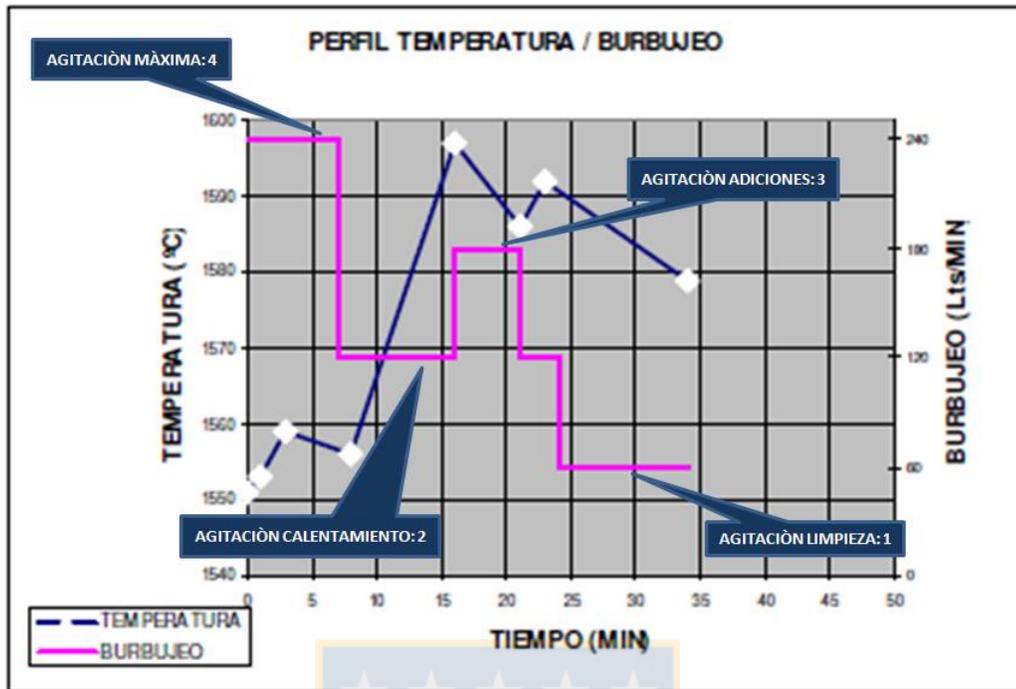


Figura 39: Perfil de tratamiento simplificado que ilustra el control de agitación y temperatura.⁴⁰

En el control de agitación el operador ajusta el nivel de agitación con la finalidad de obtener un “ojo de argón” dependiendo de la etapa de tratamiento, tal como se ilustra a continuación en las figura 40 y 41.

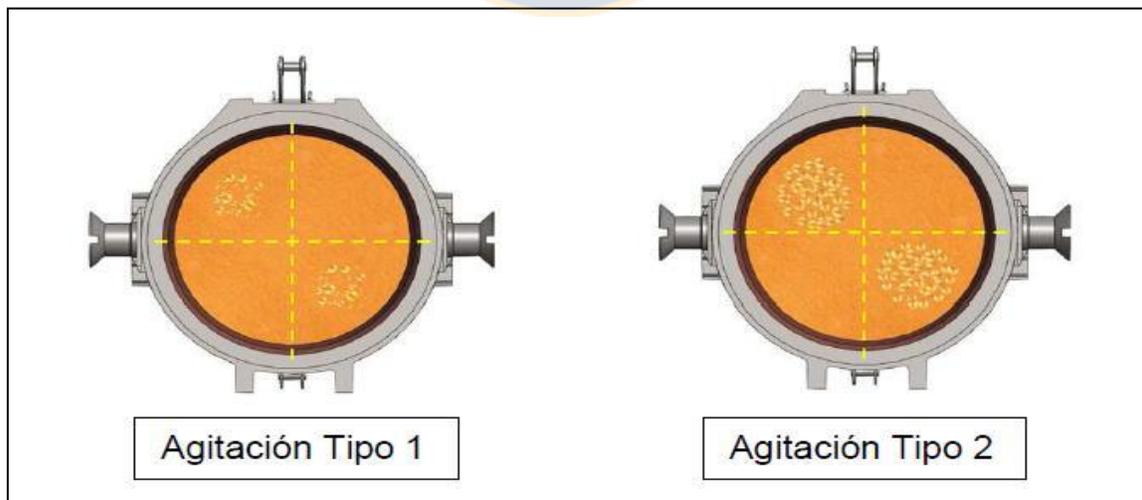


Figura 40: Agitación con Argón con dos porosos operando.⁴¹

⁴⁰ (CAP Acero, 2016)



Figura 41: Agitación con Argón con un poroso operando⁴²

2) Tasa de Calentamiento

Para asegurar el correcto control de la temperatura del acero fundido en la cuchara durante la metalurgia secundaria, se utiliza una tasa de calentamiento. Esta se define por dos parámetros del sistema de control de la estación de ajuste: CURVA y TAP.

El parámetro CURVA se ha establecido normalmente en el máximo valor, siendo este un valor constante, vale decir, no se puede variar. De este modo, la tasa de calentamiento se controla con TAP de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 20: Aporte de temperatura por cada minuto de calentamiento en diferentes TAP.⁴³

TAP (CURVA máx)	Tasa, °C/min (aprox)
6	Mantiene T°
9	2 a 3
12	3 a 4
15	4 a 5

⁴¹ (CAP Acero, 2016)

⁴² (CAP Acero, 2016)

⁴³ (CAP Acero, 2016)

Anexo I: Ensayo de Macrografías

Una vez cortados los trozos de palanquillas y enviado a Ensayos Físicos de IDAC desde la Acería, estas se cortan en trozos transversales de 150 mm aproximadamente y se someten a ataque químico.

La solución de ataque está compuesta por 50% HCl (al 33%) y 50% agua, concentración general usada para todos los productos.

Se ubican las muestras en un capacho con capacidad de 20 litros, procurando que la superficie a investigar quede libre, y si agrega primero el ácido clorhídrico hasta la mitad de la altura del recipiente, luego se rellena con agua hasta 2 centímetros del borde para evitar un posible rebalse.

Una vez preparadas las muestras, se prende el mechero a gas para calentar la solución, la cual se demora entre 15 a 30 minutos en alcanzar la temperatura objetivo (entre 70 a 80°C). La temperatura se monitorea remotamente o con termómetro de vidrio.

El tiempo efectivo de ataque para las palanquillas transversales es de 60 minutos.

Una vez cumplido el tiempo de ataque, se apaga el mechero, se vacía la solución de ataque mediante una manguera y se introduce agua caliente al capacho, procurando que las muestras húmedas no entren en contacto con el aire (evitar la oxidación).

Se retiran las muestras del recipiente, se limpian con escobilla de plástico y suficiente agua caliente, y se proceden a secar con aire comprimido, procedimiento después del cual las macrografías se encuentran en condiciones óptimas para ser analizadas.

Anexo J: Macrografías de pruebas realizadas sin M-EMS.

Prueba 1



Figura 42: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cabeza.

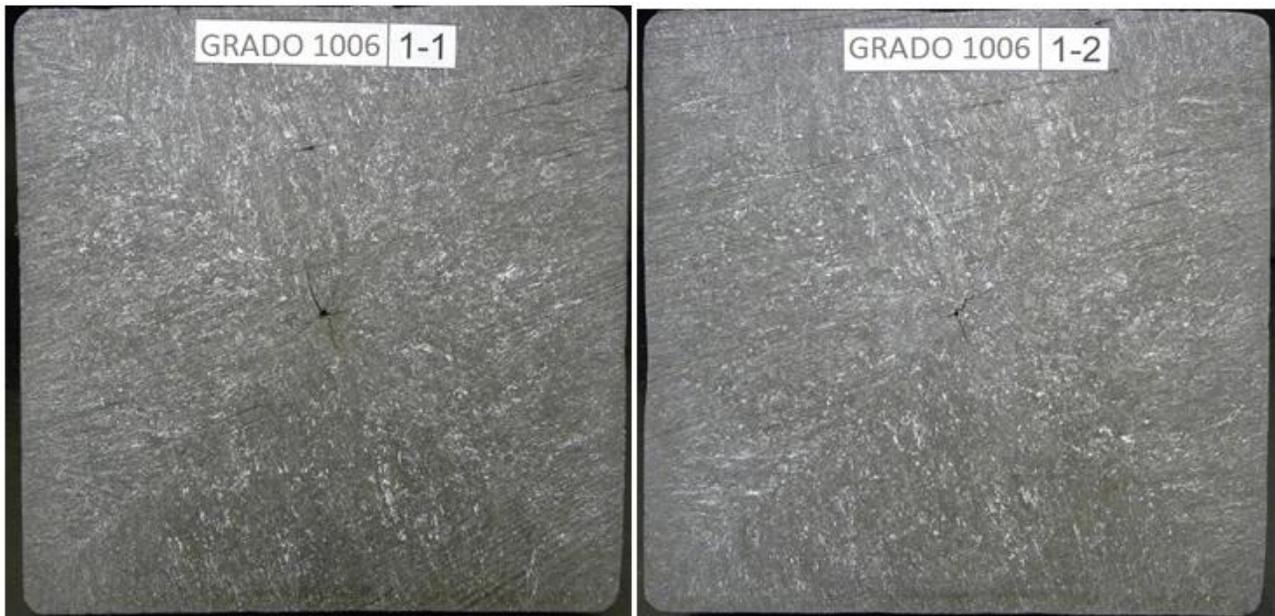


Figura 43: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Medio.

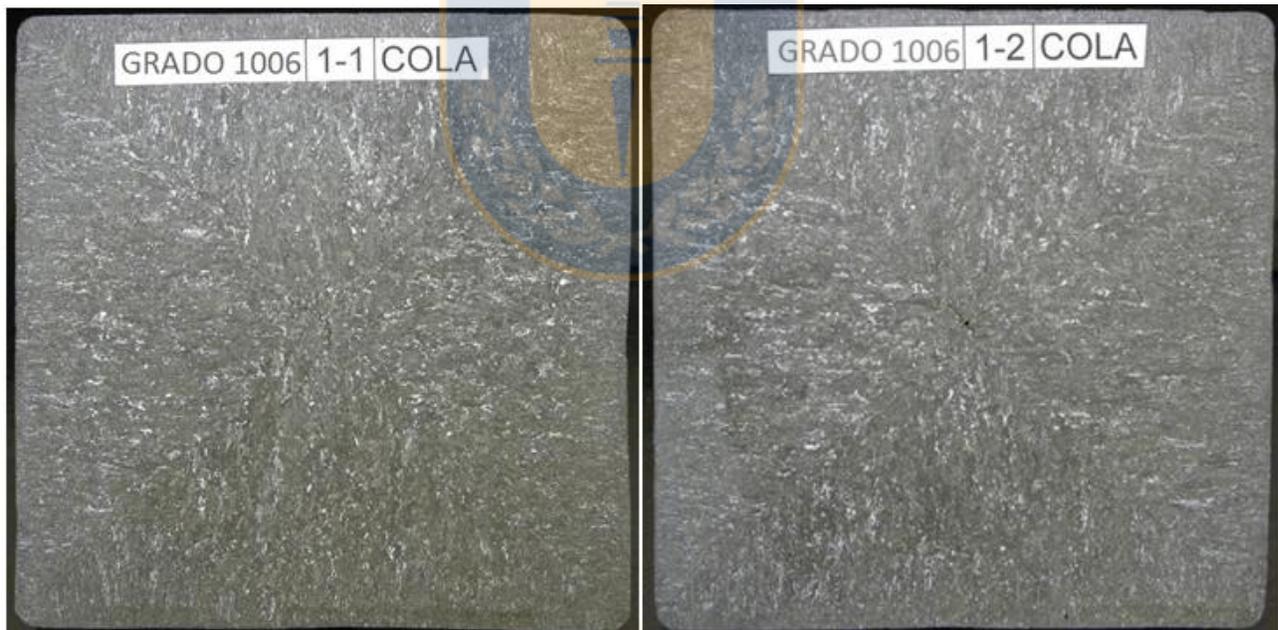


Figura 44: Macrografías de palanquillas 1 y 2 grado 1006. Muestra Cola.

Prueba 2

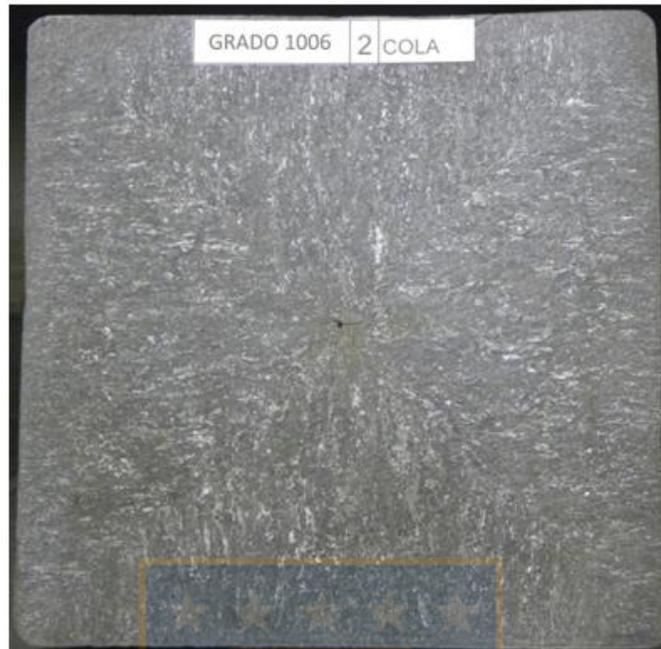


Figura 45: Macrografía de muestra Cola, correspondientes a la línea 2 de la Colada Continua.



Figura 46: Macrografía de muestra Cabeza, correspondientes a la línea 2 de la Colada Continua.

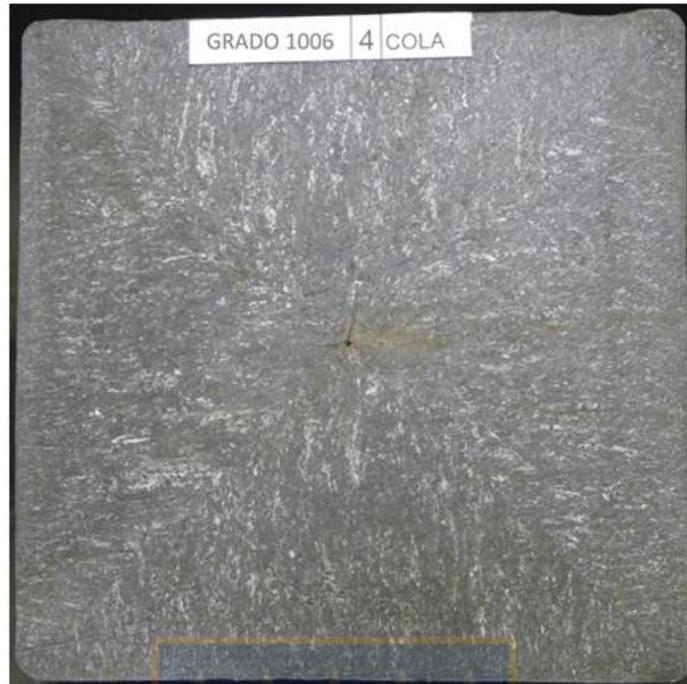


Figura 47: Macrografía de muestra Cola, correspondientes a la línea 4 de la Colada Continua



Figura 48: Macrografía de muestra Cabeza, correspondientes a la línea 4 de la Colada Continua.